

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Kalibrace 3D TASTERu

Calibration of 3D TASTER

Student:

Bc. Ondřej Srba

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Šárka Tichá, Ph.D.

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění a montáže

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ondřej Srba**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Specializace: 20 Strojírenská technologie  
Téma: **Kalibrace 3D TASTERU**  
**Calibration of 3D TASTER**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte analýzu současného stavu kalibrace měřidel na měření odchylek polohy v podmínkách firmy UNIMETRA spol. s r.o.
2. Proveďte konstrukční návrh přípravku pro kalibraci 3D TASTERŮ.
3. Proveďte návrh kalibračního postupu kalibrace 3D TASTERŮ v podmínkách firmy.
4. Proveďte praktické ověření návrhu včetně vyhodnocení a porovnání výsledků s výsledky stávajícího způsobu kalibrace.
5. Proveďte celkové zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] NENÁHLO, Čeněk. *Metrologie výrobního procesu*. Praha: Vydavatelství norem Praha. 1990. 111 s. ISBN 80-85111-08-X
- [2] Dokument EA4/02. *Vyjadřování nejistot měření při kalibraci*. Praha: Český normalizační institut, 2001. 70 s.
- [3] ČSN EN ISO 10012-1 *Požadavky na zabezpečení jakosti měřicího zařízení*. Praha: Český normalizační institut, 2003. 27 s.
- [4] Firemní literatura

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

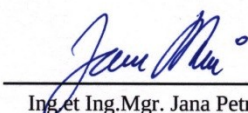
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Šárka Tichá, Ph.D.**


Konzultant diplomové práce: Ing. Jan Vavřina

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013




  
Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20. 5. 2013

Handwritten signature in blue ink, reading "Ondřej Šolc". Below the signature is a dotted line.

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20. 5. 2013



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Ondřej Srba

Adresa trvalého pobytu autora práce: Dolní Jasenka 768, 755 01 Vsetín

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Srba, O. *Kalibrace 3D TASTERu* : diplomová práce. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2013, 92 s. Vedoucí práce: Tichá, Š.

Předmětem mé diplomové práce pod názvem „Kalibrace 3D TASTERu“ je návrh a praktické ověření nového přípravku pro jeho kalibraci. V první části moji práce jsem teoreticky rozebral problematiku měření odchylek polohy na obráběcích strojích. Třetí kapitola zahrnovala analýzu současného stavu kalibrace 3D TASTERu a popis stávajícího přípravku. Následující kapitola je věnována konstrukčnímu návrhu nového přípravku s cílem odstranění chyb a nedostatků stávajícího přípravku. Další kapitola se zabývá návrhem kalibračního postupu pro kalibraci 3D TASTERů. Obsahem předposlední kapitoly je praktické ověření návrhu, včetně vyhodnocení a porovnání získaných výsledků s výsledky stávajícího způsobu kalibrace. V závěrečné kapitole je provedeno celkové zhodnocení jak po stránce technické, tak i ekonomické. Z výsledků řešení zadaného úkolu vyplývá, že navržené řešení splňuje požadavky.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

Srba, O. *Calibration of 3D TASTER* : Master Thesis. Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Working and Assembly, 2013, 92 p. Thesis head: Tichá, Š.

The main topic of my thesis „*Calibration of 3D TASTER*“ is proposal and verification of new component for calibration. The first part of thesis include theoretical specification of issues about measuring of deflections in connection with technical machine tool. Next part of thesis is devoted to the analysis of current state of calibration of 3D TASTER and characterization of existing component. The purpose of next chapter is to design new component with intention of minimize defects and deficiencies of previous one. The next step is the proposal of calibration procedure for calibration of 3D TASTER. In the last two parts of my thesis I verify the proposal in practice, including evaluation and comparison of measured values. The results of thesis fulfil adjusted requirements.

# OBSAH

strana

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>- 8 -</b>
<b>0 ÚVOD .....</b>	<b>- 9 -</b>
<b>1 CÍL PRÁCE .....</b>	<b>- 10 -</b>
<b>2 TEORETICKÝ ROZBOR PROBLEMATIKY MĚŘENÍ ODCHYLEK POLOHY NA OBRÁBĚCÍCH STROJÍCH.....</b>	<b>- 11 -</b>
2.1 Měření ve výrobním procesu .....	- 11 -
2.1.1 Přesnost výroby.....	- 12 -
2.1.2 Obráběcí stroje.....	- 13 -
2.1.3 Technická kontrola v automatizované výrobě .....	- 15 -
2.2 Zásady správného měření.....	- 15 -
2.3 Zásady pro volbu měřidla.....	- 16 -
2.4 Měření na obráběcích strojích.....	- 19 -
2.5 Měření a kontrola geometrických parametrů povrchu .....	- 21 -
2.5.1 Měření a kontrola odchylek polohy a tvaru na třísouřadnicových strojích ...	- 23 -
2.6 Kontrola geometrické přesnosti víceosých strojů .....	- 24 -
2.6.1 Problematika geometrické přesnosti .....	- 24 -
2.6.2 Vodorovnost, rovinnost a kolmost.....	- 25 -
2.6.3 Nastavení správné součinnosti os .....	- 26 -
2.6.4 Moderní metody měření geometrické přesnosti .....	- 26 -
<b>3 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU KALIBRACE MĚŘIDEL NA MĚŘENÍ ODCHYLEK POLOHY V PODMÍNKÁCH FIRMY UNIMETRA, spol. s r.o. ....</b>	<b>- 30 -</b>
3.1 Stávající přípravek pro kalibraci měřidla .....	- 30 -
3.2 Nevýhody a výhody stávajícího přípravku .....	- 37 -
<b>4 KONSTRUKČNÍ NÁVRH NOVÉHO PŘÍPRAVKU PRO KALIBRACI 3D TASTERŮ.....</b>	<b>- 40 -</b>
4.1 Vylepšení stávajícího přípravku.....	- 40 -

<b>5</b>	<b>NÁVRH KALIBRAČNÍHO POSTUPU KALIBRACE 3D TASTERŮ V PODMÍNKÁCH FIRMY UNIMETRA, spol. s.r.o.</b>	<b>- 49 -</b>
5.1	Kalibrační postup pro kalibraci 3D TASTERŮ	- 49 -
<b>6</b>	<b>PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ NÁVRHU VČETNĚ VYHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ S VÝSLEDKY STÁVAJÍCÍHO ZPŮSOBU KALIBRACE</b>	<b>- 51 -</b>
6.1	Výsledky naměřených hodnot a vyhodnocení kalibrovaných 3D TASTERŮ	- 51 -
6.1.1	Kalibrace 3D TASTERu Universal - Serial No. 45779	- 51 -
6.1.2	Kalibrace 3D TASTER Universal - evidenční č. 14/008	- 67 -
6.1.3	3D TASTER Universal - evidenční č. 14/008 na stávajícím přípravku	- 75 -
<b>7</b>	<b>CELKOVÉ ZHODNOCENÍ</b>	<b>- 86 -</b>
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>- 89 -</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>	<b>- 91 -</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>- 92 -</b>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

Značení	Jednotka	Význam
IT		stupeň přesnosti
K		relativní třída
L	[m]	maximální měřicí rozsah
U	[ $\mu\text{m}$ ]	rozšířená nejistota měření pro pravděpodobnost $p = \sim 90 \%$
c	[-]	koefficient citlivosti
fe	[ $\mu\text{m}$ ]	odchylka měřicího rozsahu (v jednom směru)
fges	[ $\mu\text{m}$ ]	celková odchylka měřicího rozsahu (v obou směrech)
ft	[ $\mu\text{m}$ ]	odchylka dílčího měřicího rozsahu
fu	[ $\mu\text{m}$ ]	odchylka reverzibility (hystereze)
fw	[ $\mu\text{m}$ ]	opakovatelnost
k <sub>a</sub>	[-]	koefficient rozšíření pro pravděpodobnost $p = \sim 68,3 \%$
n	[-]	počet naměřených hodnot
s(x)	[ $\mu\text{m}$ ]	výběrová směrodatná odchylka
t <sub>a</sub>	[s]	doba potřebná k sejmutí souřadnic měřeného prvku
t <sub>ab</sub>	[s]	doba zpoždění měřicího systému
u	[ $\mu\text{m}$ ]	nejistota měření
u <sub>A</sub>	[ $\mu\text{m}$ ]	standardní nejistota typu A
u <sub>B</sub>	[ $\mu\text{m}$ ]	standardní nejistota typu B
u <sub>c</sub>	[ $\mu\text{m}$ ]	kombinovaná standardní nejistota
v <sub>s</sub>	[mm.min <sup>-1</sup> ]	posuvová rychlost
$\bar{x}$	[mm]	aritmetický průměr
x <sub>i</sub>	[mm]	naměřená hodnota v příslušném bodě
z	[ $\mu\text{m}$ ]	dovolená chyba
$\Delta$	[ $\mu\text{m}$ ]	odchylka aritmetického průměru
$\alpha$	[K <sup>-1</sup> ]	koefficient teplotní roztažnosti



## 0 ÚVOD

Podstatou řešeného problému mojí diplomové práce je kalibrace 3D TASTERů ve společnosti UNIMETRA, spol. s.r.o. Obecně je kalibrace měřidel nedílnou součástí každé společnosti, která používá měřidla, protože jakékoliv pracovní měřidlo nestanovené podléhá prvotní kalibraci a následné rekalibraci. Toto téma mě zaujalo z toho důvodu, že 3D TASTERy jsou na trhu teprve pár let a je to něco nového v oblasti metrologie. Zároveň si ale myslím, že kalibrace měřidel je v dnešní době hodně důležitá pro zajištění jednotnosti a správnosti měření z důvodů rostoucích požadavků ze strany zákazníka.

Kalibrace etalonů a pracovních měřidel nestanovených je základním prostředkem při zajišťování návaznosti výsledků měření. Kalibrací měřidel se dosahuje toho, že jsou buď přiřčeny hodnoty měřených veličin k indikovaným hodnotám, nebo se stanoví korekce vůči indikovaným hodnotám. Výsledek kalibrace se poté zaznamená do kalibračního listu. Každá kalibrační laboratoř by měla být akreditována Českým institutem pro akreditaci (ČIA) dle ČSN EN ISO/IEC 17025, aby mohla kalibraci provádět.

Velká problematika nastává při měření odchylek polohy na obráběcích strojích. Tomu se snaží zabránit vývoj nových 3D TASTERů, které právě slouží k určení nulového bodu na obrobku, určení středu otvoru, určení a korekci ustavení obrobku a pro měření délky a hloubky. Práce s těmito tastery je rychlá a snadná, snižuje výrobní čas, zvyšuje produktivitu a přesnost obsluhy. Řekl bych, že 3D TASTER je kombinací číselníkového úchylkoměru a páčkového úchylkoměru.

3D TASTER ovšem zatím není až tak známý a rozšířený a stále hodně firem raději používá k měření geometrických odchylek na obráběcích strojích číselníkové a páčkové úchylkoměry. Když se ale podíváme na 3D TASTERy, jejich přesnost a kvalita jde nahoru. Příkladem je přecházení z analogových na digitální, které jsou přesnější a snaží se, ať je dovolená chyba co nejmenší. V dnešní moderní době, je to určitě krok dopředu a myslím si, že se do budoucna dostane do podvědomí zákazníků, kteří určují pohyb na trhu.

Nakonec bych řekl, že měřidlo bez kalibrace je jako dopis bez známky.

# 1 CÍL PRÁCE

Hlavním cílem diplomové práce je návrh a praktické ověření nového přípravku pro jeho kalibraci 3D TASTERů. Než se ale dostaneme k samotné kalibraci, musíme si nejprve teoreticky shrnout a rozebrat problematiku měření geometrických odchylek na obráběcích strojích. V této kapitole popíši, jak probíhá měření ve výrobním procesu, uvedu zásady správného měření a zásady pro správnou volbu měřidla. Dále se budu zabývat měřením na obráběcích strojích, měření a kontrole geometrických parametrů povrchu a na závěr kontrolu geometrické přesnosti na víceosých strojích.

V následující kapitole se už zaměřím na analýzu současného stavu kalibrace měřidel na měření odchylek polohy v podmínkách firmy UNIMETRA, spol. s.r.o. Zde se budu věnovat stávajícímu přípravku na kalibraci 3D TASTERů. Popíši jednotlivé části stávajícího přípravku a vytknu jeho největší nevýhody i výhody.

Ve čtvrté kapitole už vymyslím konstrukční návrh nového přípravku pro kalibraci 3D TASTERů a pokusím se odstranit co nejvíce chyb ze stávajícího přípravku. V AutoCADu udělám výkresovou dokumentaci tohoto přípravku, podle které se bude konstruovat.

Po zkonstruování nového přípravku v další kapitole sepíši návrh kalibračního postupu kalibrace 3D TASTERů v podmínkách firmy UNIMETRA, spol. s.r.o. Tento kalibrační postup vyhotovím podle kalibračního postupu číselníkových úchylkoměrů. V těchto třech kapitolách mi podnik poskytnul veškeré potřebné informace pro zhotovení diplomové práce.

V předposlední kapitole budu už prakticky ověřovat návrh včetně vyhodnocení a porovnání výsledku s výsledky stávajícího způsobu kalibrace. Pro nejpřesnější vyhodnocení budu dvakrát měřit stejný typ 3D TASTERu na novém přípravku a poté pro porovnání jeden z těchto typů na stávajícím přípravku.

Sedmá a taky poslední kapitola bude celkové zhodnocení, ve kterém shrnu poznatky z předcházejících kapitol a provedu závěrečné zhodnocení. Výsledkem mé diplomové práce bude na základě získaných poznatků posoudit, zda navržený přípravek je lepší oproti stávajícímu řešení a zda se osvědčí, jak po stránce technické, tak i ekonomické.

## **2 TEORETICKÝ ROZBOR PROBLEMATIKY MĚŘENÍ ODCHYLEK POLOHY NA OBRÁBĚCÍCH STROJÍCH**

Metrologie přestává být výlučnou záležitostí metrologických středisek a potřebuje týmovou spolupráci s ostatními odbornými útvary společností, se závody a provozy. Byla-li doposud rozhodující metrologickou činností kontrola (kalibrace) pracovních měřidel, rozšiřuje se teď okruh hlavních metrologických činností a do metrologie se začleňují další pracovníci, a to zejména technického, výrobního a investičního úseku.

### **2.1 Měření ve výrobním procesu**

Průmyslová výroba, obzvláště strojírenství, prochází složitým, ale dynamickým vývojem. Zvyšuje se přesnost, technická náročnost vyráběných strojů a provozní spolehlivost. Dále se mění organizační struktura průmyslových organizací, zintenzivňuje se úroveň organizace a techniky řízení. V neposlední řadě se přechází od následné kontroly jakosti ke komplexnímu systému řízení jakosti.

Veškeré uvedené faktory ovlivňují metrologii a měření a jsou také jimi samy ovlivňovány. Dalším prvkem, jenž zřetelně ovlivňuje metrologii a měření, je pokračující automatizace strojírenské výroby.

Z hlediska četnosti technických a fyzikálních veličin jsou pro strojírenskou výrobu významné zejména geometrické veličiny, ať už jde o veličiny technické, jako je drsnost povrchu, nebo o fyzikální, např. délku, rovinný úhel a jejich kombinace. Tyto uvedené veličiny představují více než 50 % všech měřených veličin v podniku, v obrobech a závodech s výrazně mechanickým charakterem výroby představují dokonce 80 až 90 %.

Geometrické veličiny nejsou specifické výhradně pro výrobní proces, ale měří se i v průběhu celého reprodukčního procesu: [1]

- Ve výzkumu a vývoji: během výzkumu strojů a jejich částí, při technologických zkouškách (např. u ověřování nových výrobních postupů v technologické laboratoři nebo v dílně), při výrobě a zkouškách prototypů.
- Ve vlastní výrobě: zvláště v rozsahu primární kontroly, prováděné výrobním dělníkem či seřizovačem, popř. na interní montáži.

- U kontroly jakosti výroby: na vstupní a ve výrobní kontrole v rámci tzv. sekundární kontroly (mezioperační, montážní a konečné kontroly) a během funkčních zkoušek sériově vyráběných strojů.
- Na externích montážích a v obchodně technických službách: u uvádění výrobních zařízení do provozu u odběratelů.
- V útvarech technické obsluhy výroby: hlavně při kontrole geometrické a pracovní přesnosti výrobních zařízení v provozu ve vlastní firmě.
- V metrologických, popř. měrových střediscích a laboratořích: například při periodické kalibraci délkových a úhlových měřidel. Dále u provádění speciálních měření, pro která nemají jiné odborné útvary nezbytné měřicí zařízení.

Měření a měřicí technika jsou ovlivňovány z technického a ekonomického hlediska řadou okolností, z nichž v následujících kapitolách proberu ty nejvýznamnější.

### 2.1.1 Přesnost výroby

Posuzovat složitost a náročnost různorodých strojírenských výrobků z hlediska jejich dopadu na úroveň měření je vzhledem k rozdílnosti jednotlivých výrobních odvětví složité. Z tohoto důvodu se pokusím odhadnout jejich náročnost dle jediného parametru, který je nicméně pro metrologii a měření mimořádně důležitý, a to podle geometrické přesnosti vyráběných strojů a přesnosti výroby.

Přesnost rozměru se zpravidla charakterizuje stupněm přesnosti (IT). Pro strojírenskou výrobu malých a středních strojů se z velké části předepisují tolerance ve stupni přesnosti IT7 a horší. V některých odvětvích, jako při výrobě obráběcích strojů, v automobilovém a leteckém průmyslu v IT5 a IT6. U výroby měřidel se požadují stupně přesnosti IT3 až IT5. Dále u velkých délek (rozměry přes 500 mm) se při výrobě součástí nejčastěji předepisují stupně přesnosti IT10 a IT11, zřídka i IT8. V případě rovinného úhlu se obvykle vyskytují tolerované úhly ve stupních přesnosti AT4 až AT7. [1]

Tyto stupně přesnosti jsou voleny s ohledem na požadovanou funkčnost součástí s přihlédnutím k nutné hospodárnosti výroby a ekonomickou stránku výroby. U některých funkčně významných ploch se požadované přesnosti rozměrů prudce zvyšují. Např. při konstrukci obráběcích strojů se vyžaduje přesnost úhlového natáčení u otočných stolů obráběcích center v intervalu 2 až 3''. Ještě zřetelněji se projevuje zvyšování přesnosti

u tolerancí odchylek polohy a tvaru. V náročných oblastech strojírenské výroby a v přesné mechanice se předepisuje:

- U odchylky přímosti až 0,5  $\mu\text{m}$  na 1 m.
- U odchylky rovinnosti až 1,0  $\mu\text{m}$  na 1 m.
- U odchylky kruhovitosti až 0,1  $\mu\text{m}$ .

V následující tabulce, viz tab. 2.1 je ukázán vliv geometrických odchylek a parametrů na jakost výroby.

**Tab. 2.1** Vliv geometrických odchylek a parametrů na jakost výroby [1]

Plocha	Geometrické odchylky a parametry			
	Poloha	Tvar	Vlnitost povrchu	Drsnost povrchu
Vzhledové plochy			++	++
Základové plochy pro povrchové vrstvy			+	+
Elektrické činné plochy				++
Obtékané plochy		+		+
Těsnící plochy	+	+	+	+
Měřicí plochy	++	++		++
Plochy nástrojů pro:				
- Třískové obrábění			+	+
- Tváření		+		+
- Válcování	+	+		+
Opěrné plochy	+	+		
Vodící plochy	+	++	+	+

Poznámka: ++ velmi významný vliv,

+ významný vliv.

### 2.1.2 Obráběcí stroje

Ve výrobních střediscích našich společností se stále více prosazují NC, CNC obráběcí stroje a automatizovaná technologická pracoviště. Automatizace obráběcích strojů je umožněna rozvíjením číslíkového řízení a zaváděním mikroelektrických prvků, které ovlivňují výrobní proces obzvláště:

- Zvyšováním produktivity práce.
- Zvyšováním jakosti výrobků.
- Zvyšování ekonomické efektivnosti výroby.
- Snižováním lidské námahy při zvyšování kultury práce a pracovního prostředí.

Typickým reprezentantem progresivních NC a CNC strojů jsou obráběcí centra, používaná k výrobě rotačních i nerotačních součástí. Obráběcí centrum je číslicově řízený víceúčelový stroj, jenž je schopen vykonávat odlišné operace při jednom upnutí obrobku, vybírat a vyměňovat různé nástroje, řídit posuv, otáčky i provést kontrolu obrobku přímo v pracovním prostoru stroje.

Při hodnocení přesnosti výroby NC a CNC strojů je důležité si uvědomit, že tato přesnost závisí na vlastnostech a technické úrovni stroje a na zvolené technologii. U konvenčních a ručně řízených strojů je přesnost do jisté míry ovlivněna zkušeností obsluhy a jejími zásahy do výrobního procesu. Při hodnocení zvláště obráběcích center si musíme uvědomit, že to jsou v podstatě univerzální obráběcí stroje, na nichž se provádí jak hrubovací práce, tak i práce na čisto.

U některých typů NC strojů, zejména u obráběcích center, je zabudován interní automatický kontrolní systém. Jeho úkolem je nepřetržitá kontrola stroje s cílem zabránit trendům, které by vedly ke vzniku neshodných výrobků nebo ohrozily výrobní proces. Měřicí systémy slouží ke kontrole jakosti výrobku či ke kontrole řezného nástroje. Během kontroly obrobku se uplatňují dvě metody: [1]

- Kontrola v režimu in-process (v reálném čase).
- Kontrola v režimu post-process (následná kontrola).

Při první metodě in-process se obrobky měří přímo v pracovním prostoru stroje. Přitom se zpravidla měřicí snímač vysune ze zásobníku nástrojů, upne do saní či do jiného posuvného prvku a proměří dle programu obrobenou součást. Na základě výsledků kontroly vyhodnotí řídicí systém polohu obrobku a udělá příslušné korekce (např. transformaci souřadnic nebo posunutí nulového bodu).

Při druhé metodě post-process se obrobek kontroluje mimo pracovní prostor stroje. Při realizaci této metody manipulátor vytáhne obrobenou součást a přemístí ji do měřicí stanice. Zatímco se měří (kontroluje) obrobek, obrábí se už další součást. Měřené hodnoty se vyhodnocují v řídicím systému, nicméně jich může být využito pro korekce až při následujícím obrábění.

Jednou z výhod bezobslužného provozu CNC stroje je automatická kontrola stavu řezného nástroje. Podle velikosti opotřebení odhaleného snímačem provede řídicí systém potřebnou korekci. Touto kontrolou lze rovněž zjistit nesprávně upnutý nástroj, jenž by mohl vést ke kolizi či být příčinou vzniku vadného výrobku.

### 2.1.3 Technická kontrola v automatizované výrobě

Organizace technické kontroly, její způsob práce a vybavení měřicí technikou závisí na druhu a uspořádání výrobního střediska, popř. výrobního systému. Odlišuje se od technické kontroly v konvenční výrobě, obzvláště v následujících bodech:

- Zaváděním automatizovaných strojů se zvyšuje i přesnost výroby, kdy úměrně k tomu se musí zvyšovat i přesnost měření.
- Vzhledem k zvyšující se přesnosti výroby se věnuje zvýšená pozornost jednotnosti a přesnosti měření. V první řadě kalibraci měřidel, používaných ve výrobním procesu, a také přesnosti výrobních zařízení.
- S postupující automatizací výrobního procesu, se vzrůstající technickou úrovní CNC strojů a se zaváděním automatizované montáže vznikají nové složky a problémy v práci technické kontroly. Vybavení NC a CNC obráběcích strojů měřicími systémy umožní provádět kontrolu jakosti přímo na obráběcím stroji automaticky bez zásahu operátora.

Přesnost obráběcích strojů se zvyšuje a je obtížné zachovat zásadu prof. G. Berndta, aby nejistota měření nebyla větší než pětina až desetina tolerance znaku jakosti, jenž se kontroluje.

## 2.2 Zásady správného měření

Během měření se musí dodržovat určité předpisy, vyplývající ze všeobecných metrologických požadavků na správnost měření a vztahující se k jistým závazným ustanovením, např. technickým normám. Ze všeobecných zásad bych vybral ty nejdůležitější, jakou jsou: [1]

- Dbát na správné osvětlení pracoviště (optimální osvětlení během měření je 800 až 1200 lx).
- Dbát u přesných měření na to, aby se teplota pracoviště neodlišovala od normální teploty o více než 1 °C.
- Opakovat každé měření vícekrát (minimálně dvakrát), a z měřených hodnot vypočítat aritmetický průměr.
- Překontrolovat nastavení úchylkoměrů, popř. komparátorů koncovými měrkami nebo jiným vhodným etalonem při delší řadě měření v pravidelných intervalech.
- Dbát na to, aby měřidla používaná ve výrobním procesu byla v předepsaných lhůtách předkládána ke kalibraci.

- Při delších přestávkách mezi měřeními chránit funkční měřicí plochy před korozí vazelínou či jiným vhodným prostředkem.

Pro laboratorní i dílenské měření a pro přípravu metrologických operací mají velký význam ovlivňující veličiny. Při přesných měřeních je třeba tyto veličiny brát v potaz, a to už při přípravě měření - např. volit takový měřicí postup, jenž by vliv těchto veličin na výsledek měření vyloučil. U délkových a úhlových měření se uvažují tyto ovlivňující veličiny: [1]

- Teplota +20 °C.
- Relativní vlhkost vzduchu 58 %.
- Atmosférický tlak 101 325 Pa.
- Poloha měřené délky vodorovná.
- Poloha roviny, ve které leží měřený úhel vodorovná.

Mimo uvedených veličin, které jsou dány mezinárodními nebo státními technickými normami, je třeba podle povahy kontrolní operace uvažovat s ještě dalšími veličinami, např. s měřicí silou. Jelikož je vliv měřicí síly u přesných měření i při kontrole tenkostěnných součástí či součástí z měkkých materiálů značný, je potřeba dodržovat měřicí sílu v předepsaných mezích a při kalibraci měřidel tuto sílu kontrolovat.

Výsledek měření se koriguje výpočtem, v poslední době se ovšem uplatňuje výpočetní technika. Zvláště na souřadnicových měřících strojích se měřené hodnoty korigují automaticky. Jedná se hlavně o korekci teploty a měřicí síly měřících doteků. Tyto korekce pomáhají nejen zvyšovat přesnost měření, ale také zlepšovat celkovou ekonomiku měřicí operace, např. tolerance teploty ovzduší může být při teplotní korekci podstatně vyšší než v případě, kdy se korekce neprovádí.

## 2.3 Zásady pro volbu měřidla

Základní rozhodnutí o výběru měřidla pro určitou operaci se zpravidla učiní už v předvýrobní etapě. Podílí se na něm vývojový technolog, projektant, v některých situacích ve spolupráci s technickou kontrolou nebo metrologem. Nejdříve se posuzuje, v jakém výrobním středisku bude měřidlo nasazeno a potom se s ohledem na to volí příslušný druh měřidla.

Při podrobnější analýze je potřeba v rámci kontrolní technologie zvážit, jak bude v příslušném výrobním středisku zabezpečována kontrola jakosti. V tab. 2.2 budu posuzovat vhodnost vybraných druhů měřidel pro určité kontrolní operace.



**Tab. 2.2** Možnosti využití měřících přístrojů podle kritérií vztažených k výrobnímu procesu [1]

Kritérium	Měřidla na obráběcích strojích	Dílenská komunální měřidla	Víceroz- měrové měřící přípravky	Souřad- nicové měřící stroje	Měřící roboty
Rotační obrobky					
- přírubové	0	0	0	X	0
- hřídelové	X	X	X	X	0
Skříňové obrobky	0	X	-	X	X
Ploché obrobky	-	X	0	0	X
Typ výroby					
- sériová	X	0	X	0	X
- kusová	-	X	-	X	-
Automatizace výroby					
- relativní pružná	X	0	X	X	0
- relativní tuhá	X	X	0	0	X
Podíl NC strojů					
- vysoký	X	0	0	X	X
- nízký	-	0	X	0	-
Výrobní časy					
- dlouhé	0	0	0	X	0
- krátké	X	X	X	0	X
Měřící časy					
- dlouhé	-	0	0	X	0
- krátké	X	X	X	-	X

Vysvětlivky: X je použití velmi dobré,

0 je použití vyhovující,

- použití je méně vhodné.

Nejvýznamnějším kritériem pro volbu měřidla posuzované metrologickými potřebami je vztah mezi přesností měření a výrobní tolerancí. Místo přesnosti měření se často uvažuje s mezní chybou, popř. nejistotou měřidla.

Požadavky na přesnost měření obráběcích strojů a jejich komponentů jsou upřesněny v ČSN 20 0300, část 2 Měření geometrické přesnosti obráběcích strojů. Obráběcí stroje se dle této normy rozdělují podle přesnosti do pěti absolutních tříd. K těmto třídám jsou přiřazeny největší dovolené chyby měření. Konkrétní druhy obráběcích strojů jsou rozděleny podle přesnosti do tzv. relativních tříd (maximálně 3), označovaných K 1, K 2, popř. K 3. Do třídy přesnosti K1 patří stroje, jejichž přesnost odpovídá přesnosti strojů běžného použití podle technických norem. Z toho vyplývá, že jednotlivé typy strojů nemůžeme navzájem dle relativních tříd porovnávat. Příkladem bych uvedl, že bruska na závity je mnohem přesnější než revolverový soustruh, ačkoliv oba stroje mohou mít relativní třídu shodnou, tj. K 1. V tab.

2.3 jsou uvedeny dovolené chyby měření, přiřazené k jednotlivým absolutním třídám přesnosti. Tabulka je doplněna výběrem relativních tříd přesnosti nejběžněji používaných druhů strojů. Z tohoto úseku tabulky lze posoudit přesnost uvedených typů obráběcích strojů.

**Tab. 2.3** Požadavky na přesnost měření obráběcích strojů [1]

Třída přesnosti v absolutním systému	I	II	III	IV	V
Chyba měření	20 %		25 %		30 %
Druh obráběcího stroje	Třída přesnosti v relativním systému				
Jednovřetenové automatické soustruhy revolverové	K 1				
Jednovřetenové automatické soustruhy s posuvným vřeteníkem		K 1	K 2		
Několikavřetenové automat. a poloautomat. vodorovné soustruhy	K 1	K 2			
Revolverové, svislé a čelní soustruhy	K 1	K 2			
Hrotové univerzální soustruhy	K 1	K 2	K 3		
Několikanožové kopírovací a několikanožové poloautomat. soustruhy	K 1				
Otočné vrtačky	K 1				
Svislé vrtačky	K 1	K 2			
Vodorovné vyvrtávačky	K 1	K 2			
Souřadnicové vyvrtávačky přesné				K 1	K 2
Souřadnicové brusky				K 1	K 2
Hrotové brusky		K 1	K 2	K 3	
Brusky na vnitřní broušení		K 1	K 2	K 3	
Brusky na závity			K 1	K 2	
Rovinné brusky (kromě svislých)		K 1	K 2	K 3	
Rovinné brusky svislé		K 1	K 2		
Frézky	K 1	K 2			
Hoblovky	K 1	K 2			

Při stanovení chyby měření ve všech třech předešlých případech je třeba uvažovat všechny složky této chyby: [1]

- Chybu měřicího přístroje, včetně chyby vzniklé jeho metrologickou návazností.
- Chybu měřicí metody.
- Chybu etalonu (při srovnávacích měřeních, např. na komparátorech).
- Chybu zapříčiněnou ovlivňujícími veličinami, a to zejména prostředím.
- Chybu osobní.

Nicméně, z chyby měření musí být přijatelným měřicím postupem nebo výpočtem předem vyloučena její známá složka systematické chyby (např. korekcí měřicí síly, teploty, atd.). V chybě měřicího přístroje je zahrnuta i chyba vyhodnocení výsledků měření, jenž v případě měřidel pro kontrolu obráběcích strojů nesmí přesáhnout desetinu celkové chyby.

## 2.4 Měření na obráběcích strojích

Měřicí hlavy a číslicové měřicí systémy jsou významnými prvky, které umožňují provádět měření přímo na obráběcích strojích, obzvláště NC strojích, popř. modernizovat konvenční stroje. Tyto prvky se rovněž mohou využívat při výrobě měřicích přístrojů a přípravků.

### Měřicí hlavy

Umožňují dotykové měření v několika souřadnicích a používají se na NC strojích při různých operacích: [1]

- Při vyrovnávání součástí na pracovním stole stroje před obrobením.
- Při měření polohy, popř. stavu nebo poškození řezného nástroje.
- Při měření tolerovaných ploch či rozměrů bezprostředně po obrobení.
- Při kontrole přesnosti jednotlivých funkčních skupin obráběcího stroje.

Během vyrovnávání obrobku se zjišťuje skutečná poloha součástí na pracovním stole. Smyslem této kontroly je zpřesnit ustavení součásti vzhledem k souřadnicovému systému stroje, popřípadě zadat nezbytné korekce do řídicího systému stroje či ustavit součást do takové polohy, která umožňuje optimální rozdělení a využití přídavků na obrábění.

Při kontrole stavu řezného nástroje se nástroj, přesunutý automaticky ze zásobníku stroje do vřetena stroje, nastavuje pomocí měřicí hlavy, která je pevně ustavena, nebo se vysune ve speciálním držáku do pracovního prostoru obráběcího stroje.

Měření rozměrů po obrobení přichází v úvahu zvláště v těch případech, kdy technická kontrola není opatřena měřicí technikou, která by umožňovala rychle a s postačující přesností kontrolovat obrobek pokud možno okamžitě po obrobení. Měření rozměrů na stroji by mělo být omezováno na nejmenší možnou míru, poněvadž to znamená přerušení obráběcího cyklu a tím pádem zhoršuje ekonomiku využití NC stroje (vznikají prostroje).

Kontrola přesnosti obráběcího stroje prováděná měřicí hlavou upnutou např. ve vřetenu stroje, je hodně rychlá, operativní a přispívá ke zvýšení přesnosti obrábění. Pomocí pracovních etalonů, např. kontrolních úhelníků, průměrných pravítek, apod. lze rozeznat příslušné odchylky geometrických parametrů stroje a tyto odchylky korigovat v řídicím systému nebo je přímo odstranit opravou nebo seřízením.

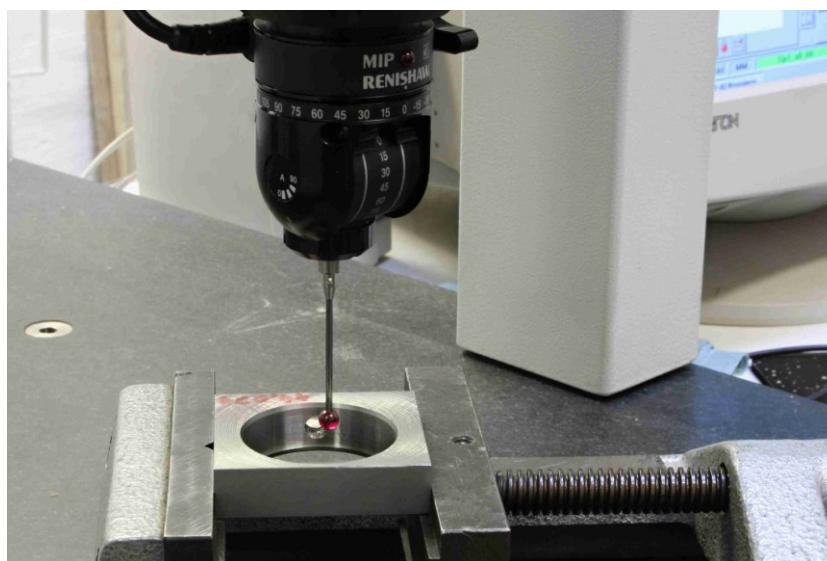
Měřicí hlava se obvykle ukládá do zásobníku nástrojů, odkud se na základě programu automaticky přemístí a upne do vřetena stroje. Signály z měřicí hlavy se přenášejí z velké části bezdotykově (telemetricky).

Příkladem bych uvedl měřicí hlavu 3D (viz obr. 2.1). Měřicí signál je vyvolán dotekem snímače s obrobkem. Toto se děje v dynamickém režimu, tj. za nepřerušného pohybu měřicí hlavy. Jelikož opoždění vyslání signálu do řídicího systému stroje by mohlo zapříčinit zkreslení výsledků měření, je potřeba stanovit maximální rychlost posuvu ( $v_s$ ) v  $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$  v okamžiku snímání rozměru. V závislosti na nejistotě měření ( $u$ ) v  $\mu\text{m}$ , při které k uvedenému zkreslení výsledků nedojde [1]:

$$v_s = \frac{60 \cdot u}{t_{ab} + t_a} \quad (2.1)$$

Kde:  $t_{ab}$  - doba zpoždění měřicího systému [s]

$t_a$  - doba potřebná k sejmutí souřadnic měřeného prvku [s].



**Obr. 2.1** Měřicí hlava 3D [8]

### Číslicové měřicí systémy

Hlavními částmi těchto číslicových měřicích systémů jsou měřítko se snímací hlavou a vyhodnocovací jednotka. Poněvadž měřicí systémy jsou určeny převážně k práci v dílenských podmínkách, ochraňují je jejich výrobci proti prachu, třískám a jiným nečistotám dokonalým zakrytím. Měřicí systémy slouží k odměřování délkových posuvů (např.

na NC strojích). Odměřenou polohu vyjadřují elektrickým signálem, který lze eventuálně použít i k řízení obráběcího stroje.

## 2.5 Měření a kontrola geometrických parametrů povrchu

Měření makrogeometrických i mikrogeometrických parametrů patří z hlediska jejich účelu pro funkci obrobků i z hlediska metrologie k nejdůležitějším měřením geometrických veličin ve strojírenství. Zpravidla se geometrické parametry rozdělují na: [1]

- Odchyłky tvaru - zapřičiněny nepřesností vodících ploch výrobních zařízení, termickou nestabilitou apod.
- Odchyłky polohy - vyvolány chybami ve vyrovnání vodících a upínacích ploch.
- Vlnitost povrchu - způsobena chvěním soustavy stroj-nástroj-obrobek atd.
- Drsnost povrchu - zapřičiněna geometrií řezného nástroje, řeznými podmínkami apod.

Během měření, popř. kontrole těchto parametrů je úsilí zachytit jak celkový tvar kontrolovaného profilu, popř. kontrolované plochy, tak i vhodnou měřicí nebo vyhodnocovací metodou oddělit navzájem jednotlivé odchyłky a tím přispět k odhalení příčin, které ve výrobním procesu tyto odchyłky způsobují.

Hlavní zásady měření odchylek polohy a tvaru jsou shrnuty v ČSN 01 4420 - Návrh měření odchylek tvaru a polohy. Společná ustavení, popř. v ČSN 01 4401 - Tolerance tvaru a polohy. Pokud na výkrese není výslovně předepsána, zahrnuje se vlnitost povrchu mezi odchyłky tvaru. Naopak drsnost povrchu má být z výsledku měření vyloučena, např. mechanicky vhodným tvarem měřicího doteku a elektrickým filtrem. [1]

Odchyłky tvaru a polohy jsou definovány pomocí obalových čar a obalových ploch. Nicméně při vyhodnocování odchylek tvaru je dovoleno používat i střední čáry a plochy. To má smysl především při vyhodnocování odchylek pomocí výpočetní techniky (např. na třísouřadnicových měřicích strojích).

U stanovení odchylek tvaru, vyhodnocovaných pomocí obalových a středních prvků, nedochází ke značným rozdílům ve výsledcích. Kromě toho je odchylka stanovená pomocí středního prvku vždy větší, než je odchylka stanovená pomocí obalového prvku. Případně může být stejně velká, takže nehrozí nebezpečí, že by vadné součásti byly při kontrole omylem vypuštěny do dalších operací jako dobré.

ČSN 01 4401 stanoví, že při měření odchylek polohy je třeba vyloučit odchylky tvaru, s výjimkou tzv. směrových tolerancí (např. rovnoběžnosti a rovinnosti či rovnoběžnosti a kolmosti). V tomto případě se při měření odchylky rovnoběžnosti nevychází od obalových, ale skutečných ploch. Zde uvedená norma výslovně nepřipouští, aby se během vyhodnocování odchylek polohy mohly používat střední prvky. U měřících přístrojů vybavených počítačem se nicméně středním prvkům nevyhneme. [1]

Velikost odchylek polohy, stanovených pomocí středních prvků, se podstatně liší od velikosti odchylek, stanovených pomocí obalových prvků. Rozdíly jsou zřetelné v obou směrech. Je to zapříčiněno tím, že měřená odchylka polohy je určena vzájemnou polohou, např. sklonem nejméně dvou vztažených prvků. Velikost odchylky tvaru je ovlivněna jenom kolmou vzdáleností vztaženého prvku od prvku skutečného. Rozdíl mezi velikostí odchylky polohy, stanovené pomocí středních a obalových prvků závisí na mnoha faktorech, jako na velikosti odchylky tvaru, na velikosti vztaženého úseku, na charakteru tvaru skutečného prvku apod.

K měření přímosti se používá většinou kroková metoda, u které je vodováha, popř. elektronická libela. Může se také použít odrazové zrcátko autokolimátoru, umístěné na měřícím můstku, jehož rozteč měřících patek bývá zpravidla představitelná. V nějakých případech však tato metoda nedostačuje a vyžaduje se kontinuální záznam měřeného profilu.

Při měření odchylek tvaru (přímost) nebo polohy (kolmost, souosost atd.) u velkých strojů nebo investičních celků se používají optické či optoelektrické metody. Měření odchylek polohy a tvaru úplnými metodami (ČSN 01 4420) je velmi náročné, tudíž se vyrábějí speciální přístroje, jenž vyhodnocují měřené odchylky v souladu s jejich definicemi. Nejrozšířenější z nich jsou přístroje na kontrolu kruhovitosti, které se vyrábějí ve dvou základních typech: [1]

- Přístroje s rotujícím stolem, na které se upínají kontrolované obrobky a s nepohyblivým snímačem.
- Přístroje s otáčejícím snímačem, kde se kontrolované obrobky upínají na nepohyblivý stůl.

Přístroje prvního typu se používají nejčastěji ke kontrole rotačních obrobků, např. části valivých ložisek. Naopak přístroje druhé skupiny slouží zejména ke kontrole rozměrnějších a hmotnějších součástí, např. skříňových nebo součástí, u kterých neleží měřený prvek v ose rotace. Na uvedených přístrojích se můžou kontrolovat i další druhy odchylek rotačních ploch

či čelních ploch rovinných, jako přímost povrchových přímek, souosost, kolmost a házení. Některé typy těchto přístrojů umožňují vyhodnocovat i válcovitost apod.

### **2.5.1 Měření a kontrola odchylek polohy a tvaru na třísouřadnicových strojích**

Při měření odchylek polohy a tvaru se používají např. třísouřadnicové měřicí stroje. Je zde možnost snímat souvisle souřadnice tvarových ploch (scanning). Velkou výhodou je, že na souřadnicových měřicích strojích se měří rozměrové parametry a odchylky tvaru i polohy zároveň. Získává se tedy souvislost mezi jednotlivými druhy měřených parametrů.

K rozšíření dále přispívají různé programy pro vyhodnocování tvarových ploch, kdy tyto programy jsou nedílnou součástí počítačových systémů na souřadnicových strojích. Poněvadž matematická konstrukce obalových prvků v počítači je docela složitá, vychází se při vyhodnocování od středních prvků. Záleží přitom na rozmístění a počtu měřených bodů, takže střední prvek není úplně jednoznačně definován. Potom je třeba u měření na souřadnicových strojích vzít v potaz nejistotu měření, která se při měření geometrických odchylek projevuje výrazněji, než při měření délkových rozměrů. [1]

Rozměrové prvky, např. průměry, se vyhodnocují na souřadnicových strojích z celé řady jednotlivých měřených bodů. Tímto se nejistota měření redukuje jejich počtem. Při měření tvaru se nejistota, kterou je zatíženo měření jediného bodu kontrolovaného profilu, zanáší v plné hodnotě do výsledku měření. Nicméně se ukazuje, že při měření odchylek tvaru hodně přesných ploch a profilů s malou výrobní tolerancí, např. IT3 a menší, bude vhodnější použít jednoúčelové přístroje.

U měření odchylek polohy různých profilů a ploch, jako je rovnoběžnost, různoběžnost nebo souměrnost os, které se dříve kontrolovaly na průměrných deskách velice obtížně a byly zatíženy značnou chybou měření, se staly na třísouřadnicových strojích rutinními nenáročnými operacemi. Rovněž jsou výhodné z hlediska přesnosti, jelikož výsledek měření může být vyhodnocen z velkého množství kontrolovaných bodů. Zvyšování počtu měřených bodů, určujících profil nebo plochu, vede k snižování nejistoty měření. Nesmíme však zapomenout na problémy definiční povahy, protože při vyhodnocování v počítači se skutečné tvarové prvky nahrazují prvky středními a ne prvky obalovými.

Programové vybavení souřadnicových měřicích strojů obsahuje univerzální i jednoúčelové programy, umožňující kontrolu a vyhodnocování polohových a tvarových

odchylek. Některé souřadnicové měřicí stroje jsou opatřeny přídatným otočným vřetenem pro plynulé měření válcovitosti a kruhovitosti. [1]

## **2.6 Kontrola geometrické přesnosti víceosých strojů**

Geometrická přesnost obráběcího stroje je jednou ze zásadních podmínek jeho úspěšného nasazení v reálné výrobě. Kontrola pěti-osých center potom představuje komplexní problematiku, kterou se v určitém rozsahu musí zabývat každý uživatel moderních strojů. [6]

Seřízení geometrické přesnosti, ať už nově instalovaného stroje nebo stroje staršího či stroje po kolizi, představuje v případě pěti-osých strojů umění, kterému je třeba se určitou dobu učit. Platí zde pověstná zásada, že čím pečlivěji, kvalitněji a propracovaněji jsou provedena všechna opatření předcházející seřízení geometrie na stroji, tím snáze je dosaženo požadovaného výsledku.

### **2.6.1 Problematika geometrické přesnosti**

Mezi ony zmiňované předchozí kroky patří obzvláště konstrukční fáze vývoje stroje a kvalita výrobní dokumentace strojních dílů a skupin. Dále to je preciznost výroby a montáže nového stroje. V poslední době jsme svědky rostoucí poptávky po pěti-osých strojích, a také rozšiřující se nabídky strojů na trhu od nejrozličnějších výrobců. Proto se servisní technici snaží využít z instalovaného stroje každou tisícinu milimetru odchylky tak, aby se přinejmenším přiblížili k požadovaným tolerancím. Starosti servisních techniků nenechávají odpočinout ani tvůrce a výrobce měřících zařízení a měřících metod. Ti si kladou za cíl ulehčit práci při servisu a zmírnit možnost lidské chyby při měření i korigování chyb. V neposlední řadě se i snaží přivést koncové uživatele k závěru, že je potřeba o své výrobní prostředky patřičně pečovat a provádět pravidelné prohlídky a navazující údržbu.

Podívejme se ve značném zjednodušení a stručnosti na příkladu svislého pěti-osého frézovacího centra s kolébkovým stolem na aktuálně používané metody kontroly geometrické přesnosti a progresivní moderní nástroje, jenž může nabídnout zkušená servisní organizace nebo špičková oborová výzkumná instituce.

Přesná libela, přesné pravítko, číselníkový úchylkoměr a měřicí trn. Tyto měřicí nástroje už více než jedno století neodmyslitelně spadají do základní výbavy každého servisního technika obráběcích strojů. V roce 1932 vydal Georg Schlesinger první soubornou knihu



popisující doporučené metody měření přesnosti obráběcích strojů. Netušil, že právě on dal základ systematickým základům nové disciplíny, která až do dnešní doby čerpá z jeho technické geniality a preciznosti. Základy měřících metod i používaných nástrojů setrvaly zachovány dodnes, i když se stroje časem velmi změnily. [7]

### 2.6.2 Vodorovnost, rovinnost a kolmost

Prvním prováděným úkonem je seřízení a kontrola ustavení stroje z hlediska vodorovnosti, a to pomocí libel. Není-li stroj usazen vodorovně a nezachovává-li vodorovnost během pohybů lineárních os v rámci celého zdvihu, nemá význam postupovat dále. Při ustavení stroje pracuje servisní technik obzvláště s kotevními prvky, jimiž je spodní lože spojeno s betonovým základem výrobní haly. V nějakých případech se může stát, že i velice kvalitní stroj vodorovnost za pohybu nezachovává. V tom případě je žádoucí zkontrolovat, zda je v pořádku struktura podkladové vrstvy, na níž stroj leží. Na následujícím obr. 2.2 můžeme vidět, jak se měří vodorovnost ustavení stroje pomocí libel.



**Obr. 2.2** Měření vodorovnosti ustavení stroje [7]

V jiných případech je uživateli zatěžko vrtat otvory do podlahy pro umístění kotevních šroubů. Hlavním úkolem dodavatele je na základě nesporných argumentů přesvědčit uživatele o nutnosti ukotvení stroje. To samozřejmě nejen z důvodu geometrické přesnosti, ale i z hlediska na dynamické chování stroje za pohybu a na stabilitu obrábění obecně.

Následujícími úkony jsou kontrola rovinnosti upínací plochy stolu stroje nebo palety a kolmosti osy frézovacího vřetena k této ploše. Dále se provede kontrola kolmosti v jednotlivých souřadných rovinách a zkouška obvodového házení vřetena na trnu. Na obr. 2.3 vidíme, jak probíhá měření kolmosti.



**Obr. 2.3** Měření kolmosti [6]

### **2.6.3 Nastavení správné součinnosti os**

Všechny výše uvedené zkoušky se téměř neliší od postupu prováděného na jednodušších tříosých strojích. Nyní je potřeba přistoupit ke kontrole a nastavení správné součinnosti os rotačních s osami lineárními. Značně důležitá je znalost skutečné polohy středů otáčení rotačních os v souřadném systému stroje. Je-li v parametrech stroje zadána poloha středů jinde, než jsou fyzicky na stroji, nemůže při součinnosti (interpolaci) těchto os stroj správně monitorovat žádanou trajektorii. V situaci svislé osy rotace stolu nebo palety je tato úloha prostá a vystačíme si s pomocí číselníkového úchylkoměru a měřicího trnu.

U osy naklápění celé kolébky už technik potřebuje větší zručnost a nejlépe program Excel, jenž mu pomůže správně určit polohu středu, respektive zjistit, o kolik je třeba změnit odpovídající strojní parametr. Tímto výčtem seznam testů geometrické přesnosti, jenž je dle konkrétních zjištění potřeba na stroji provést, nekončí. Snažím se jen upozornit na komplexnost problematiky geometrické přesnosti pěti-osých strojů. [6]

### **2.6.4 Moderní metody měření geometrické přesnosti**

Vrátíme-li se do roku 1973, nalezneme zde dva britské inženýry (David McMurtry a John Deer), kteří přišli poprvé s myšlenkou dotykové sondy. Ta byla určena pro kontrolu zvolených geometrických charakteristik dílců špičkového výrobku své doby, proudového motoru nadzvukového dopravního letounu Concorde. [7]

Od tohoto času prodělaly dotykové sondy pro souřadnicové měřicí stroje a posléze i pro obráběcí stroje převratný vývoj. Zvýšila se jejich spolehlivost, přesnost a oblast

nasazení. Není se tedy čemu divit, že si v poslední době našly svou cestu i do moderních metod pro pěti-osé stroje. Nyní zde ve stručnosti uvedu charakteristiku dvou sofistikovaných měřících systémů na bázi dotykových sond, jenž jsou využívány i v České republice.

### **Samocentrovatelná (samostředící) hlava MT-Check**

Výrobek si od začátku kladl vysoké cíle, a to v co nejkratším čase a s minimální nejistotou „měřit“ přesnost polohování a taky vybrané geometrické chyby tříosých až pěti-osých strojů, včetně dynamických odchylek za pohybu a při součinnosti více os. Samocentrovatelná hlava je založena výhradně na měření přímočarých posunutí tří prostorově orientovaných plochých doteků. Snímací elementy jsou v této situaci vysoce přené kapacitní sondy. [6]

Prosté kinematické uspořádání a celkové velice kompaktní rozměry hlavy dávají dobré předpoklady pro jednoduché a minimálně prostorově omezené nasazení při měřeních na strojích. Jednoduchý kinematický a navazující kalibrační model zaručují vysokou absolutní přesnost i opakovatelnost měřidla. Na obr. 2.4 je vidět zapojená samocentrovatelná hlava MT-Check a na následujícím obr. 2.5 lze vidět její detail.



**Obr. 2.4** Samocentrovatelná hlava MT-Check [6]



**Obr. 2.5** Detail samocentrovatelné hlavy MT-Check [7]

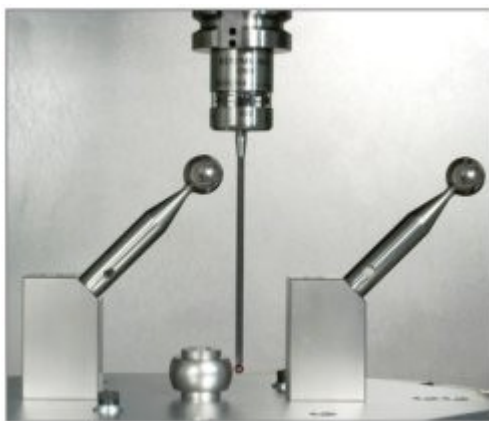
Pro nezbytnost měření přesnosti pěti-osých strojů je samocentrovatelná hlava využívána v kombinaci s jedním kulovým artefaktem, jenž je umístěn na upínací ploše měřeného stroje. Dodávaný software je koncipován zaprvé pro měření polohy středů rotačních os stroje (polární vyobrazení získaných dat společně s vyčíslením odchylek ve směru relevantních lineárních os stroje) a za druhé pro dynamická měření součinnosti rotačních a lineárních os při transformaci souřadnic používaných během souvislého pěti-osého obrábění. Zásluhou vysoké vzorkovací frekvence kapacitních snímačů lze rovněž velmi dobře postihnout jak přechodové děje při rozjezdech pohybu, tak i děje zastavené včetně vyhodnocení vlivu zpevňování os při najetí do polohy. [6]

Samocentrovatelná hlava je tedy neocenitelným pomocníkem při diagnostice příčin nepřesností objevených na reálných obrobech. Je využitelná všude, kde dochází k součinnosti rotačních a lineárních os během pracovního posuvu.

### **Měřicí sada Renishaw Axi-set**

Měření na pěti-osých obráběcích centrech je v této situaci opíráno na využití obrobkové sondy Renishaw (výrobcem je doporučena přesná tenzometrická sonda) v kombinaci s prostorovým artefaktem. Artefakt se skládá ze dvou prostorově orientovaných kulových ploch a jedné kulové plochy umístěné na základně artefaktu. Obrobková sonda musí být opatřena dlouhým dotekem, aby bezpečně dosáhla na spodní kulovou plochu při všech polohách naklonění kolébky stroje. Společně s měřidlem je dodávána sada připravených partprogramů, ve kterých se podobou zadávaných proměnných konfiguruje konkrétní měření. Dílčí partprogramy tak realizují měření jedné úlohy.

Axi-set je koncipován tak, aby byl schopen pokrýt jednak často vyžadované měření polohy středů rotačních os, tak i měření vybraných geometrických odchylek pěti-osých strojů. Na následném obr. 2.6 můžeme vidět zmiňovanou měřicí sadu Renishaw Axi-set. [7]



**Ob. 2.6** Měřicí sada Renishaw Axi-set [6]

Výstupem z jednotlivých, výrobcem pozorně předpřipravených zkoušek, jsou např.:

- Odchyłky uložení kolébky a otáčení stolu v jednotlivých souřadných rovinách.
- Odchyłky nastavení základních poloh kolébky (vodorovná, svislá).
- Určení středů otáčení rotačních os a jiné.

Výsledky zkoušek jsou zaznamenávány do textového souboru a uloženy na pevném disku řídicího systému stroje. Podstatným aspektem je existence přímé vazby na daný typ řídicího systému. Výsledky jsou též tisknuty ve formě úpravy konkrétních strojních parametrů. Tímto způsobem lze jednoduše uskutečnit efektivní servisní zásah na diagnostikovaném stroji.

### **3 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU KALIBRACE MĚŘIDEL NA MĚŘENÍ ODCHYLEK POLOHY V PODMÍNKÁCH FIRMY UNIMETRA, spol. s r.o.**

V této kapitole se budu věnovat samotné kalibraci měřidel vybrané společnosti a jak je tato činnost prováděná za poslední období. V následujících podkapitolách budu popisovat přípravek, který nyní používají pro kalibraci 3D TASTERu, jaké k tomu používají mikrometrické hlavice a číselníkový úchylkoměr. Dále budu zjišťovat, jaké můžou nastat chyby při kalibraci a výhody a nevýhody stávajícího přípravku. Zdrojem informací pro mou práci jsou poskytnuté podklady z podniku - jedná se o různé katalogy měřidel a přímé konzultace v podniku.

Než se dostaneme k samotné kapitole, zmíním pár důležitých faktů o společnosti. UNIMETRA, spol. s r.o. vznikla v roce 1992 a aktivně působí od počátku roku 1993. Cílem společnosti byl prodej měřidel a metrologické vzdělávání, např. odborné kurzy, semináře a od roku 1999 vydávání časopisu Metrologie v praxi. V současné době má firma 20 zaměstnanců, mají vlastní kalibrační laboratoř, servisní a výrobně-technické oddělení, obchodní oddělení a marketingové oddělení. Taky zde provádí servis, výrobu, technickou kontrolu, a dokonce se v prostorách společnosti nacházejí i učebny.

Společnost zavedla a používá systém managementu kvality dle ČSN EN ISO 9001:2009 a je od roku 1999 certifikována. Součástí dokumentace systému managementu kvality je Politika jakosti. Kalibrační laboratoř společnosti byla v roce 2002 akreditována Českým institutem pro akreditaci dle normy ČSN EN ISO/IEC 17025 a je zmocněna používat při své činnosti v daném rozsahu označení „Kalibrační laboratoř akreditována ČIA č. 2310“.

#### **3.1 Stávající přípravek pro kalibraci měřidla**

Než se dostaneme k samotnému přípravku pro kalibraci měřidla, zmíním bych se o nejdůležitější části, a to kalibrovaném 3D TASTERu.

##### **3D TASTER**

Obecně bych řekl, že 3-D snímače jsou velice přesné a mnohostranné měřicí přístroje. Upínají se do frézovacích a elektroerozivních strojů a slouží k:

- Určení nulového bodu na obrobku.
- Určení a korekci ustavení obrobku.
- Určení středu otvoru.
- Pro měření délky a hloubky.

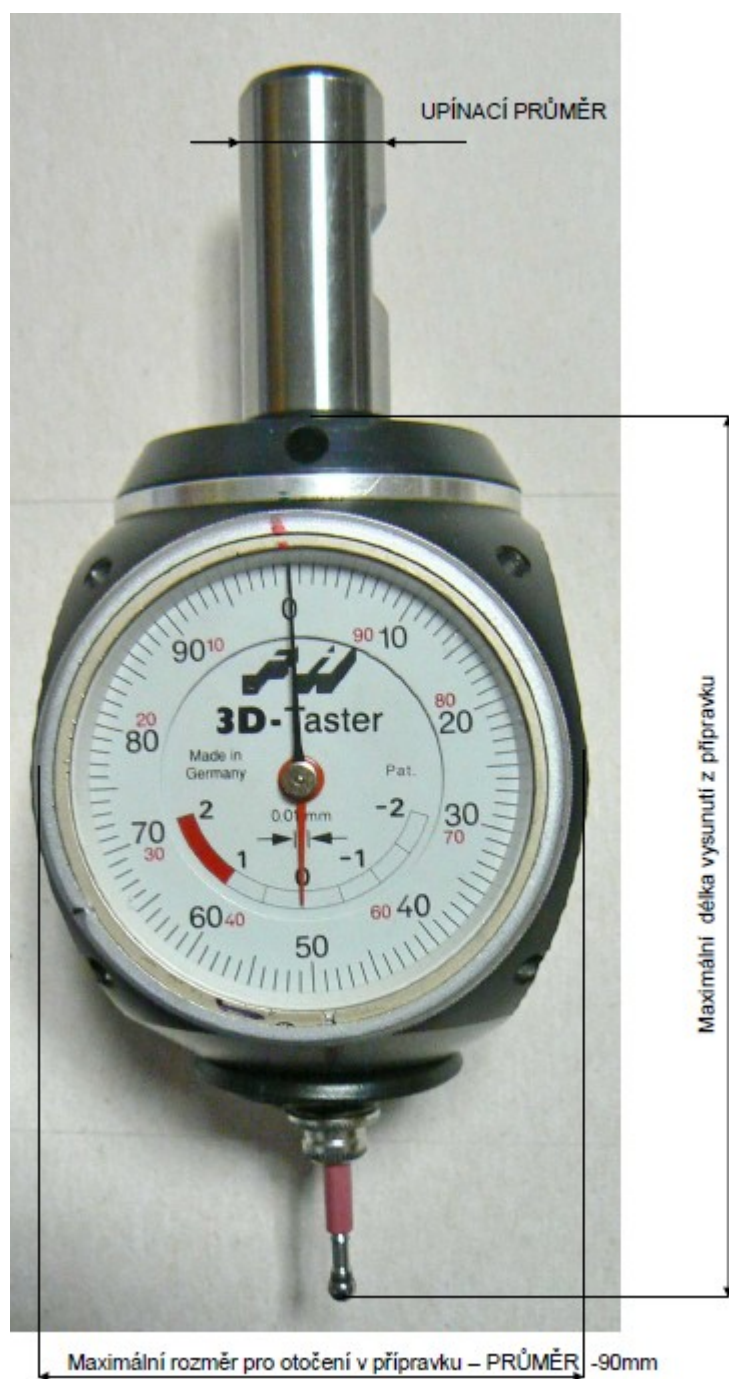
3D TASTERů je celá řada a v podniku se zkouší různé typy. Pro představu, jsem si vybral 3D TASTER, který byl použit i u tohoto přípravku a nazývá se univerzální 3-D snímač analogový. Tento snímač má následující vlastnosti: [5]

- Vhodný pro měření obrobků - je možné měření přes celý měřicí rozsah.
- Velký pracovní rozsah ve všech osách (x, y, z), zabraňuje poškození měřicího doteku při nechtěném kontaktu.
- Odolnost proti nárazu.
- Ochrana proti prachu a stříkající vodě.
- Snadno čitelný displej.

Parametry: [5]

- Upínací vložka:  $\varnothing$  20 mm.
- Hmotnost: 0,8 kg.
- Délka (bez upínací stopky): 113 mm.
- Rozměr: 113 x 65 mm.
- Pracovní rozsah v osách x, y, z: - 2 až + 2 mm.
- Dělení: 0,01 mm.
- Přesnost: 0,01 mm.
- Příslušenství: krátký snímání dotek délky 25 mm, hrot o  $\varnothing$  4 mm.

Vrátil bych se zde k upínacímu průměru 3D TASTERu. Do prizmatické podložky lze použít pouze válcové upínací vložky v rozsahu průměrů 15 až 22 mm. Konstrukčně byl přípravek zpracován na zvolený průměr 20 mm. Při upnutí 3D TASTERu (s upínacím průměrem 20 mm) s ním jde v prizmatické upínce otočit o 360° kolem osy do průměru 90 mm. Snímání dotek se musel zvolit krátký o délce 25 mm, protože delší (vyrábí se i o délce 65 mm) by se zde nevešel. Samotný 3D TASTER s nejdůležitějšími parametry můžeme vidět na obr. 3.1. Tasteryy nemají jenom upínací vložky válcové, ale provádí se i ve tvaru šestihranu apod.



**Obr. 3.1** Univerzální 3-D snímač analogový

Přípravek, který byl použit pro kalibraci 3D TASTERu se skládá ze základny, prizmatické podložky s upínacím třmenem, standardního číselníkového úchylkoměru, mikrometrické hlavice klasické a digitální a jejich držáky. Nyní si každý prvek v krátkosti představíme, abychom získali přehled o zvoleném přípravku.



### **Základová deska**

Základna sama o sobě má rozměry 260 x 160 x 10 mm (délka x šířka x tloušťka) a byla zkonstruována přesně pro přípravek. Má v sobě vyvrtány dvě díry v ose šířky pro upnutí prizmatu a další čtyři díry v rozdílné délce pro posunutí prizmatu, z důvodu rozdílných rozměrů 3D TASTERu. Dále jsou na základně přidělané tři držáky pro dvě mikrometrické hlavice a číselníkový úchylkoměr.

### **Prizmatická podložka**

Již zmiňovaná prizmatická podložka (viz obr. 3.2) má rozměry 60 x 55 x 55 mm (délka x šířka x výška) a je vyrobena z kalené oceli. Prizma má drážku, která svírá úhel 90°. Má silný upínací třmen s kolíkovou rukojetí pro upínání kulatin. Prizmatické podložky jsou broušeny v párech k zaručení vysoké rovnoběžnosti funkčních ploch. Mezní chyba se uvádí v rozmezí 0,01 až 0,004 mm. Prizma je určeno pro kulatiny o průměru  $\varnothing$  5 až 50 mm. Tato podložka slouží pro uložení 3D TASTERu při kalibraci.



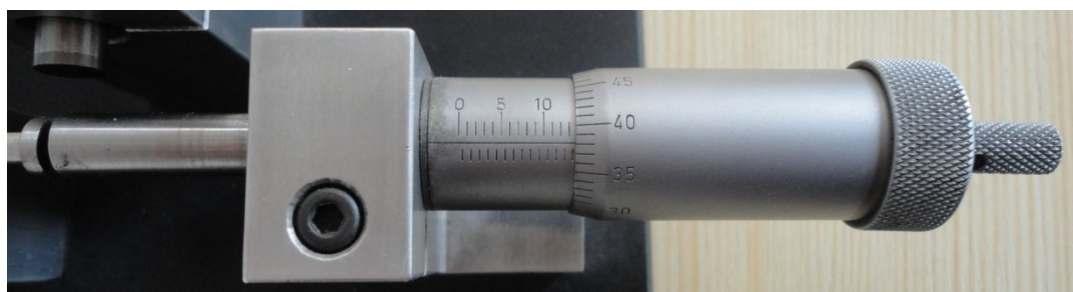
**Obr. 3.2** Prizmatická podložka s upínacím třmenem

### **Mikrometrické hlavice**

Další částí, kterou se budu zabývat, jsou mikrometrické hlavice. Byly zde použity dvě, jedna pouze za účelem pohybu, pro odečítání odchylek z číselníkového úchylkoměru

při kalibraci 3D TASTERu, a to ve směru osy  $x$  a  $y$ , tj. horizontálně. Druhá nám naopak slouží pro měření odchylek ve směru osy  $z$ , tj. vertikálně. První zmiňovaná je hlavice mikrometrická analogová - HARTIG (viz obr. 3.3). Tato hlavice má velmi dobré nastavování pohybu a je velice přesná. Provedení měřidla: [5]

- Měřící dotek z oceli.
- Mikrometrický šroub se stoupáním 0,5 mm.
- Měřící rozsah hlavice 0 - 25 mm.
- Ø měřícího bubínku 30 mm.
- Stupnice na bubínku a pouzdře matně chromovaná.
- Maximální chyba 2  $\mu\text{m}$ .
- S řehťáčkou.



**Obr. 3.3** Hlavice mikrometrická analogová - HARTIG

Druhé použité měřidlo je hlavice mikrometrická digitální - STINMEYER (viz obr. 3.4).  
Provedení měřidla: [5]

- Měřící dotek tvrdokov ( $\varnothing$  8 mm).
- Stoupání mikrošroubu 0,5 mm.
- S odečítáním 0,001 mm.
- Měřící rozsah 0 - 25 mm (měřící plocha - kulová - pozitivní).
- Měřící síla 5 - 10 N.
- Upínací prvek  $\varnothing$  12 mm.
- Bez řehťáčky.
- Výstup na počítač.

Funkce měřidla: [5]

- 0/ON/OFF (nulování, zapínání, vypínání).
- Přepínání mezi mm / inch.
- HOLD (podržení naměřené hodnoty).

- PRESET (přednastavení hodnot).
- TOL (nastavení tolerančních mezí).

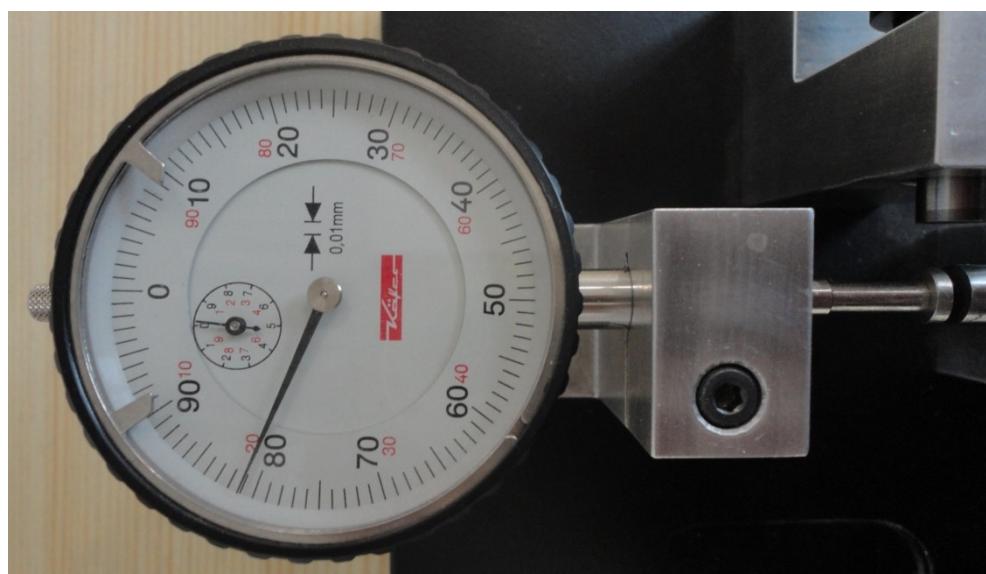


**Obr. 3.4** Hlavice mikrometrická digitální - STINMEYER

### Číselníkový úchylkoměr

Poslední použité měřidlo pro kalibraci 3D Tasteru je číselníkový úchylkoměr analogový - KÄFER (viz obr. 3.5) s odečítáním 0,01 mm, jehož použití bylo uvedeno u mikrometrických hlavíc. Podle měřicího rozsahu, který je zde 10 mm, můžeme určit tyto hodnoty: [5]

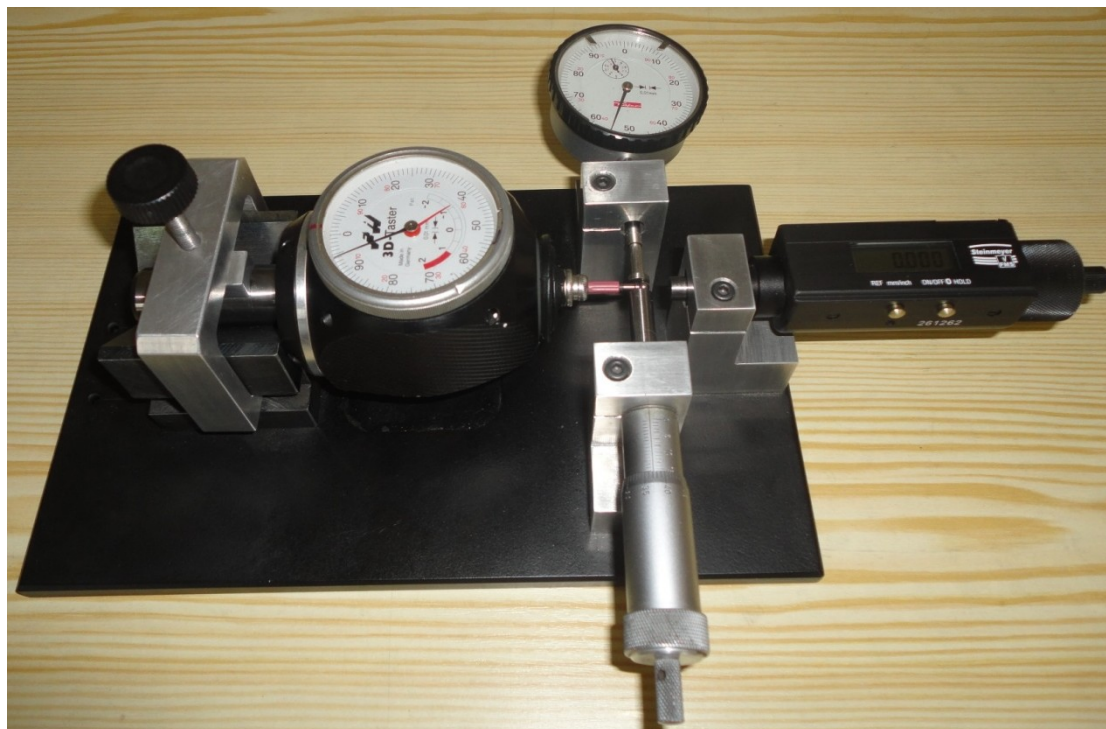
- |   |                              |
|---|------------------------------|
| • Odchylku měřicího rozsahu (v jednom směru)          | $f_e = 15 \mu\text{m}$ .     |
| • Odchylku dílčího měřicího rozsahu                   | $f_t = 5 \mu\text{m}$ .      |
| • Celkovou odchylku měřicího rozsahu (v obou směrech) | $f_{ges} = 17 \mu\text{m}$ . |
| • Opakovatelnost                                      | $f_w = 3 \mu\text{m}$ .      |
| • Odchylku reverzibility (hystereze)                  | $f_u = 3 \mu\text{m}$ .      |



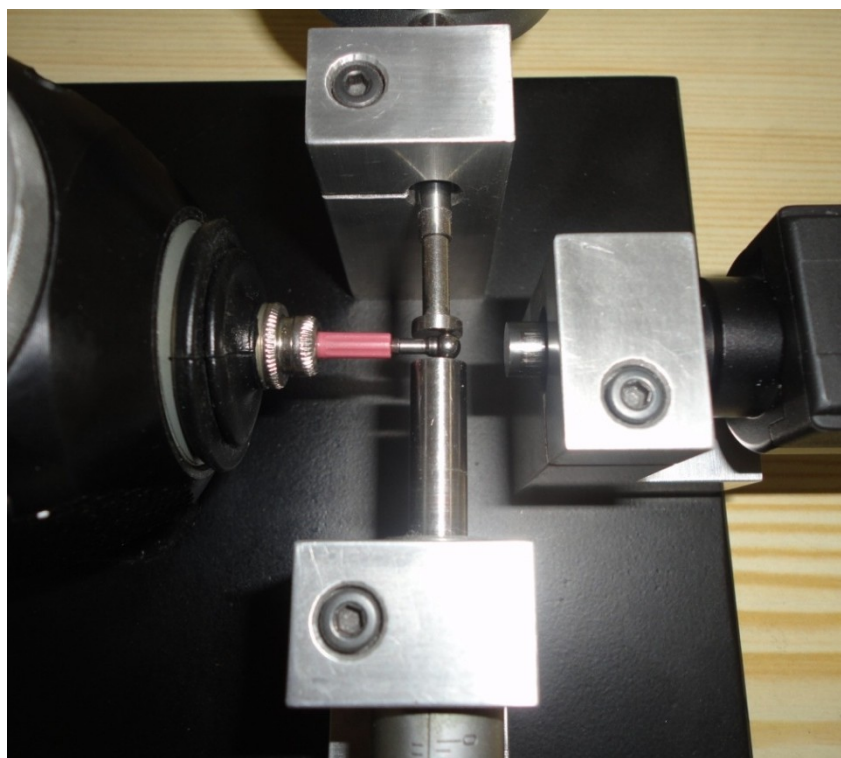
**Obr. 3.5** Číselníkový úchylkoměr analogový- KÄFER

## Přípravek

Celkové schéma přípravku i s kalibrovaným tasterem, viz obr. 3.6. Hmotnost přípravku (bez 3D TASTERu) činil 5,2 kg. Na obr. 3.7 je detail dotykového snímače 3D TASTERu a dotykové plochy měřidel, kterými se prováděla kalibrace.



**Obr. 3.6** Schéma přípravku i s 3D TASTERem



**Obr. 3.7** Detail dotykových ploch 3D TASTERu a měřidel



Po zkonstruování přípravku a vložení 3D TASTERu do prizmatické podložky mohla začít kalibrace zvoleného snímače postupně v jednotlivých osách  $x$ ,  $y$  a  $z$ . V krátkosti uvedu, jak se tato měření prováděla ve firmě:

#### **Kalibrace v ose $x$ (axiální směr)**

3D TASTER otočený s ciferníkem nahoru (viz předchozí obr. 3.6), se zjišťovala odchylka v ose  $x$  zasouváním snímacího dotyku 3D TASTERu pomocí hlavice mikrometrické digitální. V průběhu se zapisovaly hodnoty na analogovém snímači a na digitální mikrometrické hlavici a zjišťovala se zmiňovaná odchylka, abychom zjistili přesnost 3D TASTERu.

#### **Kalibrace v ose $y$ (radiální směr)**

Poté následovala kalibrace v radiálním směru, kde se pomocí klasické mikrometrické hlavice protipohybem k číselníkovému úchylkoměru měřila odchylka v ose  $y$ . Taktéž se průběžně zapisovaly hodnoty z 3D TASTERu a číselníkového úchylkoměru a byla zjištěna přesnost v této ose.

#### **Kalibrace v ose $z$ (radiální směr)**

Po otečení analogového snímače o  $90^\circ$  se mohlo měřit v ose  $z$ , přičemž postup byl stejný, jak při měření v ose  $y$ .

### **3.2 Nevýhody a výhody stávajícího přípravku**

Na závěr této kapitoly bych zmínil, jaké mohou nastat nejčastější chyby u daného přípravku při kalibraci 3D TASTERu.

#### **Nevýhody stávajícího přípravku:**

##### **a) Abbeho chyba prvního řádu**

Jako přípravek byla zvolena prizmatická podložka s upínacím třmenem, která byla určena pro analogový snímač s upínací vložkou o průměru 20 mm, abychom v průběhu měření

zajistili stejnou rovinu s ostatními měřidly. Samozřejmě, daly by se zde upnout 3D TASTERy i s upínací vložkou o průměru 15 až 22 mm, ovšem už by nastala tzv. Abbeho chyba prvního řádu. Tato chyba popisuje zvětšení úhlové chyby v závislosti na vzdálenosti.

Např. kdybychom upnuli do prizmatu 3D TASTER o upínacím průměru 22 mm, nastala by chyba v tom, že snímací dotyková plocha tasteru by byla o něco výš, než při průměru 20 mm. Tím pádem nebude dotyková plocha přesně v ose s měřidly a kalibrace už by nemusela být přesná. To samé platí i při zvolení upínacího průměru o velikosti např.  $\varnothing$  16 mm, kdy by se dotykový snímač nacházel pod osou dotykových ploch měřidel, přesněji o 4,3 mm níže, než při upnutí optimálního průměru.

#### **b) Omezení rozsahu posuvu prizmatické podložky**

Nevýhodou tohoto přípravku je, že prizmatická podložka se dá posouvat pouze v rozsahu délky 60 mm. Příkladem bych uvedl, že kdybychom chtěli na tomto přípravku kontrolovat jiný 3D TASTER, který má odlišné rozměry, konkrétně délku, nemusel by se vejít do tohoto přípravku. 3-D snímače nabízejí v příslušenství i dlouhý snímací dotek o délce 65 mm s průměrem hrotu 8 mm, tento taster bychom také nemohli zkontrolovat. Naopak, kdybychom měli taster kratší, jeho dotykový snímač by nedosáhl na měřidla a nemohl by se kalibrovat.

#### **c) Průměr 3D TASTERu**

Další důležitou složkou je celkový průměr 3D TASTERu. Pro náš přípravek je maximální průměr 90 mm, po upnutí s vyšším průměrem by se nám zde taster nevešel, a tudíž bychom ho nemohli kalibrovat. Tento fakt ovšem není až takovou nevýhodou, protože v současnosti a s postupem doby se průměry tasterů minimalizují (viz obr 3.8). Na následujícím obrázku jde vidět vývoj 3D TASTERů, přičemž vlevo máme nejnovější model, kterým firma kontroluje.



**Obr. 3.8** Vývoj 3D TASTERů

#### **d) Zvolená měřidla pro kalibraci 3D TASTERu**

Další složkou, která může ovlivnit kalibraci 3D TASTERu, jsou zvolená měřidla. Každé měřidlo má svoji dovozenou chybu měření. Z toho vyplývá, že čím přesnější měřidlo zvolíme, tím přesnější kalibrace 3D TASTERu bude. Např. nahradit číselníkový úchylkoměr za digitální nebo zvýšit přesnost, tím že vyměníme číselníkový úchylkoměr s odečítáním 0,01 mm za přesnější s odečítáním 0,001 mm. Toto jsou největší chyby a nevýhody, které mohou nastat při kalibraci při použití zvoleného přípravku.

#### **Výhody stávajícího přípravku:**

Uvedený přípravek má i svoje kladné stránky. Jednou z výhod jsou celkové rozměry přípravku a i celkem malá hmotnost (5,2 kg). Další je, že použité dvě mikrometrické hlavice jsou velice přesné, tím pádem dochází k přesné kalibraci 3D TASTERu. Na tomto přípravku lze snadno, rychle a velmi jednoduše provádět měření.

## 4 KONSTRUKČNÍ NÁVRH NOVÉHO PŘÍPRAVKU PRO KALIBRACI 3D TASTERŮ

Kapitola třetí zahrnuje konstrukční návrh přípravku pro kalibraci 3D TASTERŮ. Budu se zde zabývat vylepšením stávajícího přípravku, čili navržením nového způsobu upínání, aby bylo odstraněno co nejvíce nedostatků stávajícího řešení.

Hlavní body návrhu:

- Nové řešení upínání v přípravku.
- Návrh výměny měřidel pro zpřesnění vlastní kalibrace 3D TASTERŮ.

### 4.1 Vylepšení stávajícího přípravku

Než se dostaneme k samotným částem nového přípravku, je zde důležité zmínit se, podle čeho byl nový přípravek navrhnut. Nový přípravek jsem navrhl podle dostupných 3D TASTERŮ. 3D TASTERy vyrábí pouze dvě německé společnosti, a to HAIMER a Mahr. Společnost HAIMER vyrábí celkem pět různých tasterů a firma Mahr dva tastery. Po prostudování technických dat jejich 3D TASTERŮ, jsem musel zohlednit tři parametry, které měly vliv při navrhování nového přípravku. Jedná se o upínací průměr, průměr číselníku a délku bez upínací stopky, viz tab. 4.1.

**Tab. 4.1** Typy 3D TASTERŮ a jejich parametry

Katalog firem	3D TASTER	Rozměry		
		Upínací vložka	Průměr číselníku	Délka (bez upínací stopky)
		[mm]	[mm]	[mm]
<b>HAIMER</b>	3D TASTER Universal	20	65	113
	3D TASTER Nové Generace	12	62	100
	3D TASTER Zero Master	10	49	96
	3D TASTER Digitální	20	65	113
	Haimer Centro	16	80	92
<b>Mahr</b>	Mechanická 3D-sonda 802 NW	16	57	132
	Digitální 3D-sonda 802 EW	16	65	134



## Kleštinový upínač

Stávající přípravek má největší slabinu v prizmatické podložce, kterou budu muset nahradit. Po konzultaci a návrhu několika variant, jsem se rozhodl pro upínací kleštinu. Tyto kleštiny se používají v kovoobrábění, přesněji při frézování pro upnutí frézy. Díky této kleštině bude zajištěno, že námi kalibrovaný 3D TASTER bude mít snímací dotek v rovině (ose) s měřidly, tj. bude odstraněna Abbého chyba, která u prizmatické podložky nastávala. Dále se zlepší i samotné upínání, protože upínací vložka tasteru bude pevně uchycena v kleštině. Kleštinový upínač bude posuvný v rozsahu délky 90 mm pro rozdílné délky 3D TASTERů a pro zajištění přesnějšího měření. Samotná kleština proto bude usazena v kostce tak, aby zůstala ve stále stejné rovině.

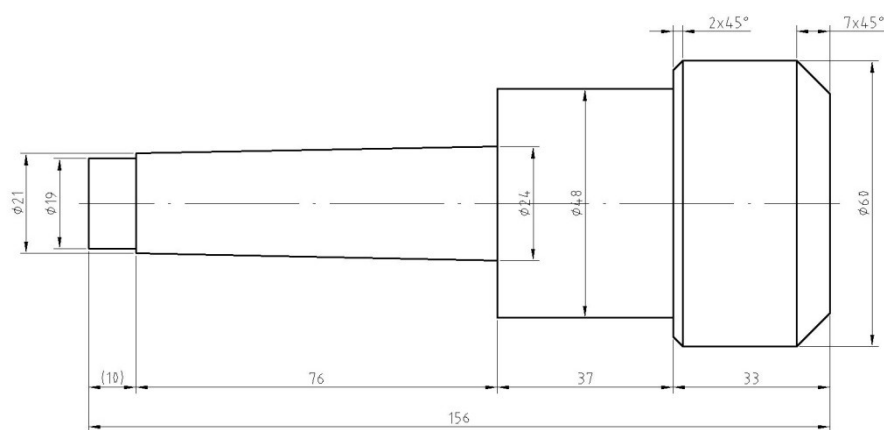
Kleština, kterou použiji pro kalibraci tasterů, se nazývá OPTIMUM Kleštinový upínač - sada (viz obr. 4.1) od firmy BOW. Tato sada obsahuje:

- kleštinový upínač MK3 / M12 / ER<sub>32</sub>,
- 7 ks kleštin: 6 / 8 / 10 / 12 / 16 / 20 / 25,
- upínací klíč.

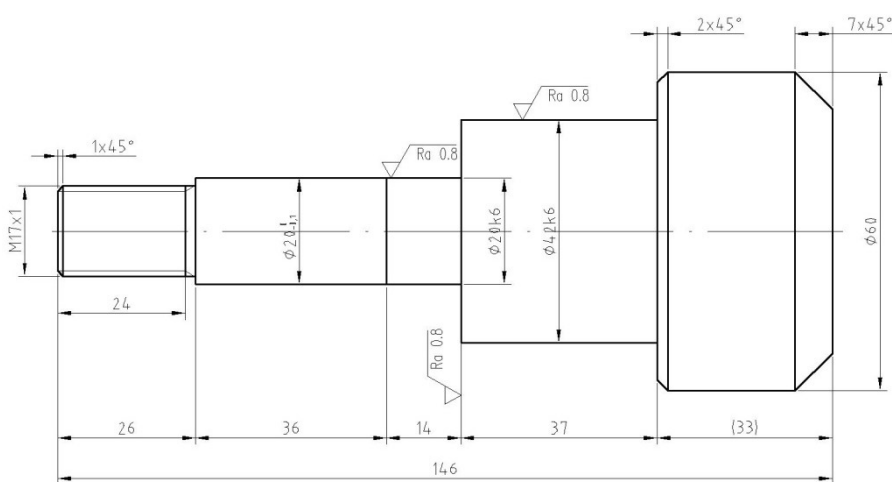


**Obr. 4.1** Sada OPTIMUM kleštinový upínač

Tento kleštinový upínač budu muset konstrukčně upravit kvůli upnutí kleštiny v kostce. Na následujících dvou obrázcích (obr. 4.2 a obr. 4.3) je nakreslený a zakótovaný původní a upravený kleštinový upínač. Podrobněji jsou tyto kleštiny zakresleny na výkrese, které jsou vloženy v příloze F (DP 101.3). Kleština se zadala upravit a obrobít do spolupracující firmy.



**Obr. 4.2** Kleštinový upínač - původní

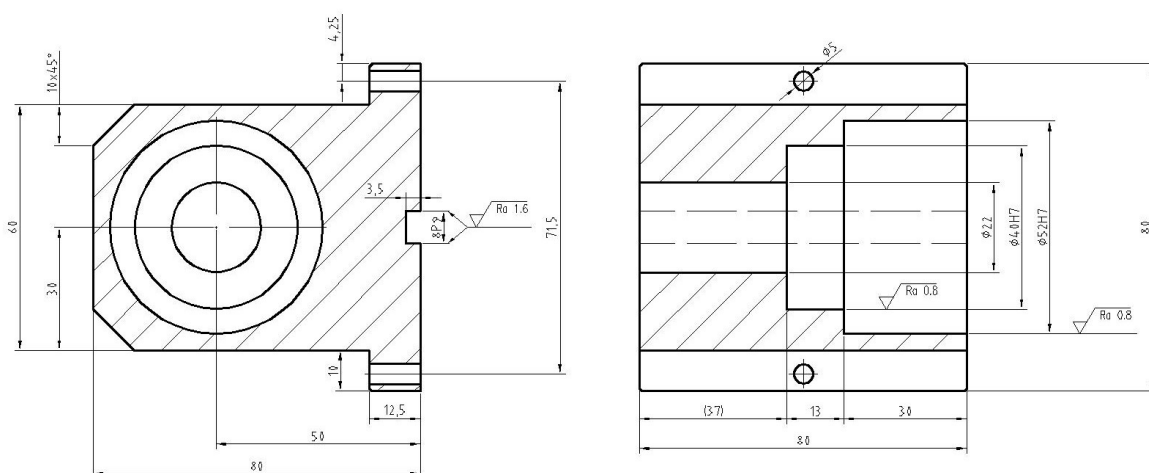


**Obr. 4.3** Kleštinový upínač - upravený

Kleštinová hlava zůstala rozměrově jako jediná bez úpravy, od této hlavy už nastaly změny. Následující průměr 48 mm, se musel obrobít na průměr 42 mm o délce 37 mm, která se nezměnila. Kuželová část kleštiny o délce 76 mm se rozdělila na dva různé průměry. Z původního průměru kužele se jedna část obrobila na průměr 20 mm o délce 50 mm a druhou část na průměr 17 mm o délce 26 mm. Na  $\phi 17$  mm se bude dělat závit M17x1. Zakótovaná část o průměru 19 mm a délce 10 mm se uřízla, aby kleština nebyla zbytečně příliš dlouhá. Průměry jsem upravil z toho důvodu, že na průměr 42 mm a průměr 20 mm budu dávat ložiska a na průměr 17 mm kruhovou matici. O těchto částech si více povíme při rozebírání celého přípravku. Na konci kleštinového upínače, se potom ještě vyvrtá otvor o průměru 10 mm a délce 50 mm pro čep, na kterém bude umístěné ruční kolečko, pro pohyb kleštiny v kostce.

### Kostka pro kleštinový upínač

Další částí přípravku je kostka z duralu, která slouží jak pro uchycení kleštiny, tak pro pohyb na základové desce - možnost kalibrovat 3D TASTERy o různých délkách. Na začátku byla kostka o rozměrech 80 x 80 x 80 mm (délka x šířka x výška), kterou jsem nechal obrobit pro náš přípravek. Rozměry kostky, viz na obr. 4.4, výkres součásti, viz příloha D (DP 101.1).



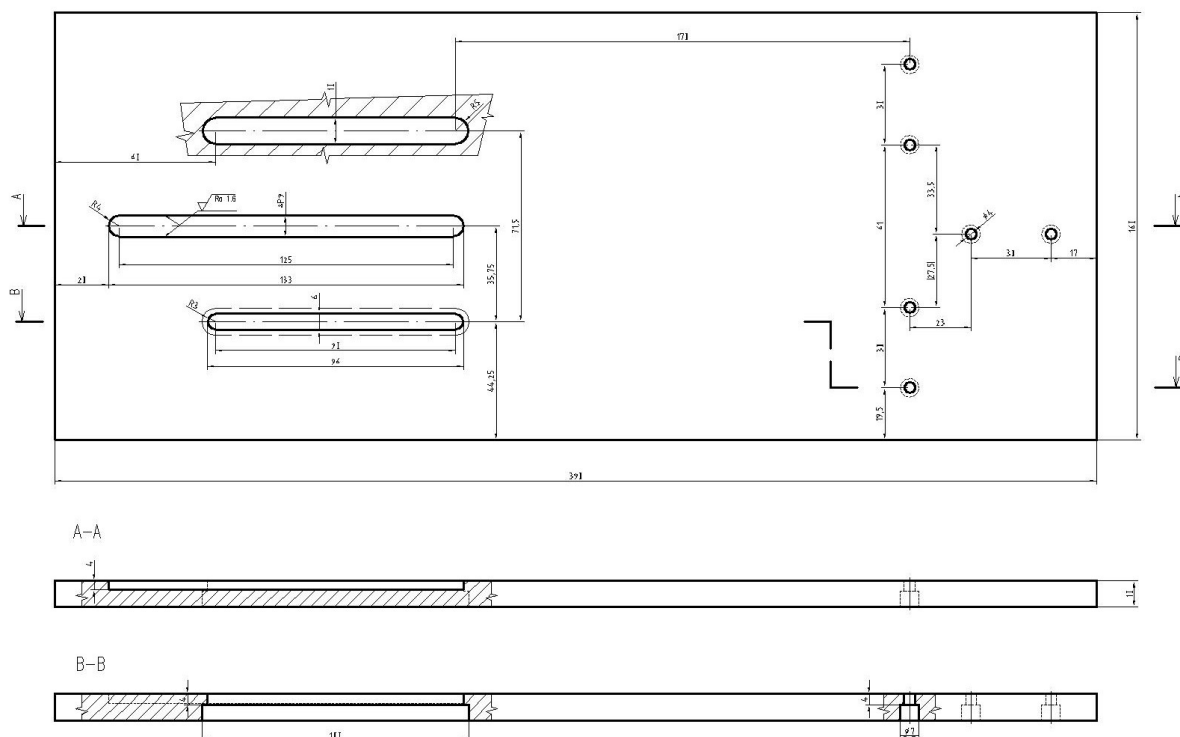
**Obr. 4.4** Kostka pro kleštinový upínač

Kostce jsem ponechal původní rozměry 80 x 80 x 80 mm. Dále se budu zabývat nejdůležitějšími rozměry, které mají vliv na celý přípravek. Do kostky jsem nechal vyvrtat tři otvory, jeden o průměru 22 mm a délce 36 mm, druhý o průměru 40 mm a délce 14 mm a třetí o průměru 52 mm a délce 30 mm. Do průměru 52 mm je vloženo jehlové ložisko a do průměru 40 mm axiální ložisko pro ustavení kleštiny. Tyto otvory jsou vyvrtány ve výšce 50 mm z toho důvodu, aby se daly kalibrovat 3D TASTERy i o větších průměrech (největší testovaný 3D TASTER měl průměr 80 mm). Dále jsou na bocích kostky dva závitové otvory M5 do hloubky 12,5 mm. Tyto otvory slouží k upevnění kostky k základové desce pomocí šroubů s vnitřním šestihranem. Poslední důležitou částí kostky je drážka pro vodící pero, která má rozměry 80 x 8 x 3,5 mm (délka x šířka x výška). Drážka slouží k zajištění pohybu kostky po základové desce a tím možnost kalibrace 3D TASTERů různých délek.

### Základová deska

Základovou desku z předchozího přípravku nelze použít kvůli nové upínací části. Této desce ovšem zůstanou některé základní parametry z předchozího řešení: její tloušťka, šířka

a také rozložení držáků pro mikrometrické hlavice a číselníkový úchylkoměr. Rozměry základové desky, viz obr. 4.5 a výkres, viz příloha E (DP 101.2).

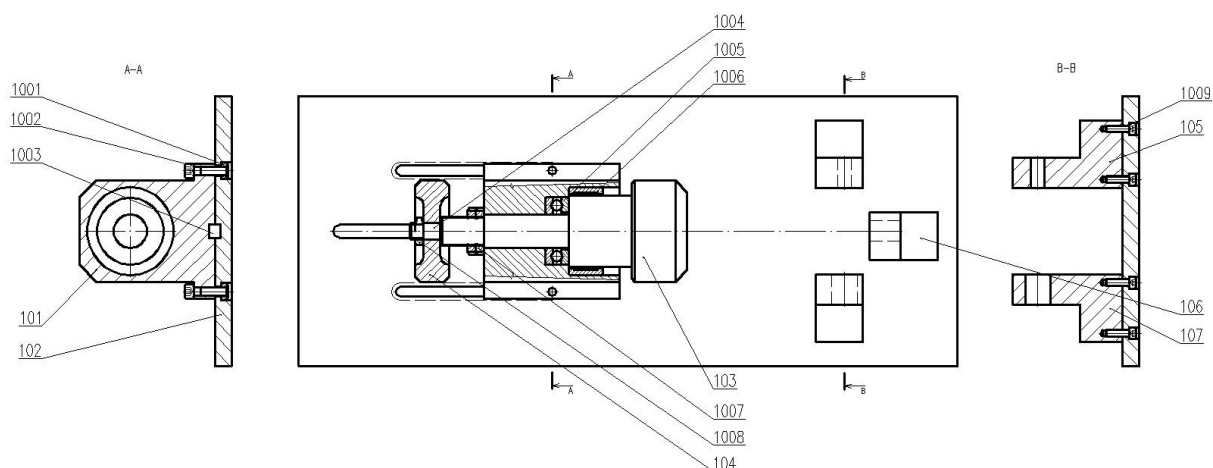


**Obr. 4.5** Základová deska

Na základovou desku se do dvou otvorů o průměru 4 mm vzdálených od sebe 30 mm připevní držák pro měřidlo, pomocí něhož se kalibruje 3D TASTER. Totéž platí i pro následující otvory o průměru 4 mm. Další částí je drážka pro vodící pero, drážka má rozměry 133 x 8 x 3,5 mm (délka x šířka x výška). Díky této drážce a vodícímu peru můžeme pohybovat s kostkou. Poté zde ještě máme dvě drážky o parametrech 96 x 6 x 4 mm a 100 x 10 x 6 mm (délka x šířka x výška) pro T matici. Pomocí této drážky a příslušné matice si můžeme nastavovat potřebnou vzdálenost podle použitého 3D TASTERu, který má různé délky. Celkový rozměr základové desky je 390 x 160 x 10 mm (délka x šířka x výška).

### **Přípravek s kleštinovým upínačem**

Nyní se tyto tři součásti smontují a vznikne nám přípravek pro kalibraci 3D TASTERu. Sestava přípravku, viz obr. 4.6 a podrobněji tento výkres v příloze C (DP 101).



**Obr. 4.6** Přípravek s kleštinovým upínačem

Na obrázku s označením 101 je kostka pro kleštinový upínač (103), která leží na základové desce (102). Dále zde máme ruční kolečko (104), které slouží k otáčení kleštinového upínače v kostce, pro zpřesnění kalibrace 3D TASTERů. Hlavní rozměry tohoto ručního kolečka, viz příloha G (DP 101.4). Posledními nenormalizovanými součástmi jsou s označením 105, 106 a 107 držáky pro měřidla. První držák (105) je pro digitální číselníkový úchylkoměr, druhý (106) pro mikrometrickou hlavici digitální a třetí (107) je pro mikrometrickou hlavici analogovou. Nyní se přesuneme k normalizovaným součástem. Jejich přesné označení a norma jsou uvedeny v příloze C (DP 101).

### **Součást 1001 a 1002**

První součást 1001 je „T“ matice M5 do obrobených upínacích drážek, kdy tato matice slouží k upnutí základové desky s kostkou (z jedné i druhé strany) pomocí šroubů s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem M5 x 20 (1002). Toto upnutí slouží k tomu, aby se nám při kalibraci 3D TASTER nepohyboval, čili se jedná o ustavení přípravku v určité délce.

### **Součást 1003**

Dále zde máme vodící pero (1003) o rozměrech 8 x 7 x 80 mm. Pero je po celé délce pohybu kostky a slouží nám jako vodící část po základové desce.

### **Součást 1004**

Další součástí na přípravku je čep o  $\varnothing 10 \times 70$  s označením 1004, kdy se na tento čep nasadí kolečko, které nám bude sloužit k otáčení kleštiny v kostce. Tím zpřesníme kalibraci

3D TASTERů, protože si budeme moc nastavit, aby byl snímací dotek tasteru přesně v poloze s měřidly.

### **Součást 1005 a 1006**

Součást 1005 je axiální kuličkové ložisko jednosměrné 51204, jenž slouží k ustavení a lepšímu otáčení kleštinového upínače v kostce. Totéž platí i pro jehlové ložisko jednořadé NK42/20 (1006). Tyto dvě ložiska slouží ke zpřesnění kalibrace.

### **Součást 1007**

Součást s označením 1007 na obrázku je upínací a stahovací kruhová matice KM3. Tyto dvě matice jsou tu z důvodu vymezení axiální vůle prvků kleštinového upínače.

### **Součást 1008**

Další součástí je šestihranná matice nízká bez sražení M10x1 (1008), která slouží k upevnění kolečka na čepu.

### **Součást 1009**

Poslední součástí na přípravku je šroub s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem (1009) o rozměrech M4x14. Pomocí těchto šroubů upevňujeme držáky pro měřidla k základové desce. Každý držák má dva otvory pro tyto šrouby.

### **Měřidla pro kalibraci 3D TASTERu**

Jediné dvě věci, které jsem ponechal z předchozího přípravku, jsou mikrometrické hlavice s jejich držáky, které jsem popsal v kapitole 2.1 Přípravek pro kalibraci měřidla. Pro zpřesnění a zkvalitnění kalibrace 3D TASTERu jsem ovšem musel vyměnit číselníkový úchylkoměr analogový - KÄFER za číselníkový úchylkoměr digitální MAHR 1075R, viz obr. 4.7. Výměnu jsem provedl z toho důvodu, že předešlý číselníkový úchylkoměr měl odečítání pouze 0,01 mm, kdežto nově zvolený má odečítání 0,001 mm, což má pozitivní dopad na přesnost kalibrace. Jistou výhodou je i výměna analogového měřidla za digitální, z důvodu

snadnějšího odečítání hodnot. Dále je zde důležité, že nově zvolený číselníkový úchylkoměr může přenášet data do PC a tím urychlit a zkvalitnit kalibraci.

Provedení měřidla MAHR 1075R: [5]

- Kapacitní měřicí systém.
- LCD displej s 8,5 mm vysokými číslicemi.
- S výstupem dat RS232C.
- Typ ochrany IP 51.
- Měřicí rozsah 12,5 mm.
- Odečítání 0,001 mm.
- Mezní chyba 0,005 mm.
- Měřicí síla 0,5 - 1,1 N.

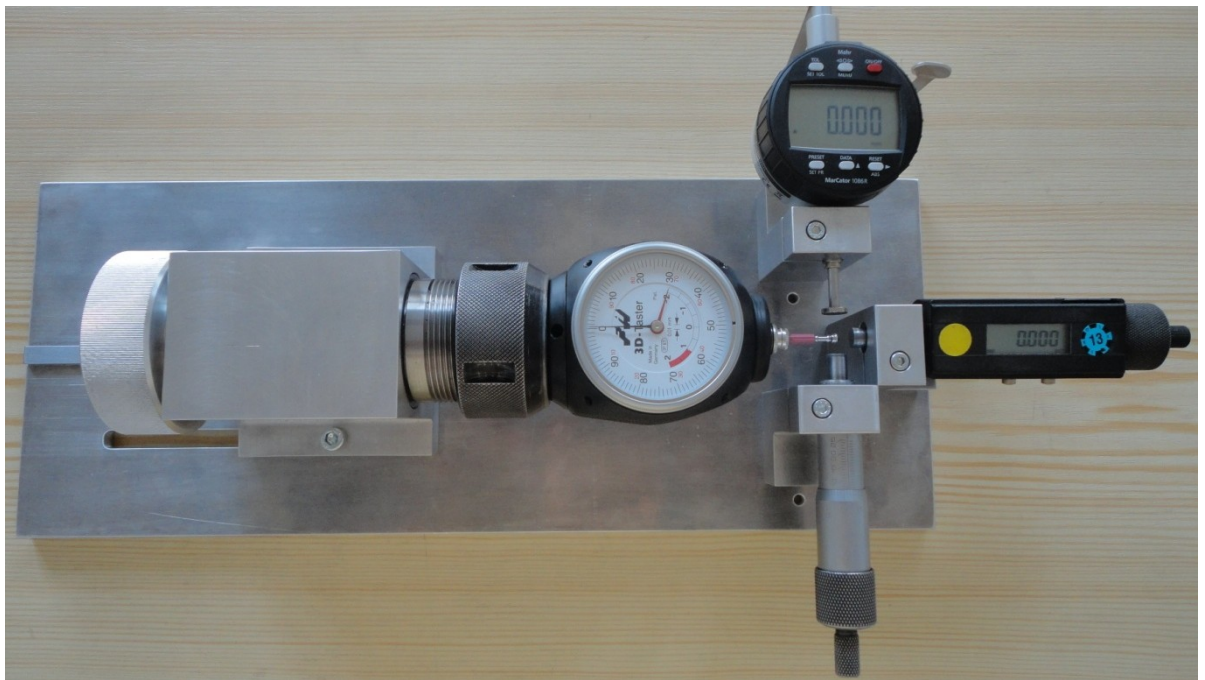
Funkce měřidla: [5]

- ON/OFF.
- Nulování.
- PRESET (přednastavení výchozí hodnoty).
- Přepínání mm / inch.
- Změna směru čítání.



**Obr. 4.7** Digitální úchylkoměr MAHR 1075R

Po zkonstruování všech částí přípravku si můžeme prohlédnout celkové schéma přípravku na následném obr. 4.8.



**Obr. 4.8** Schéma nového přípravku pro kalibraci 3D TASTERů



## **5 NÁVRH KALIBRAČNÍHO POSTUPU KALIBRACE 3D TASTERŮ V PODMÍNKÁCH FIRMY UNIMETRA, spol. s.r.o.**

V následující kapitole se budu zabývat kalibračním postupem pro kalibraci 3D TASTERŮ. Kalibrační postup obsahuje úvodní ustanovení, přípravu kalibrace, samotnou kalibraci, stanovení nejistoty měření, značení, kalibrační list, evidence, záznamy, přílohy a změny a revize.

### **5.1 Kalibrační postup pro kalibraci 3D TASTERŮ**

Firma nemá vlastní kalibrační postup pro kalibraci 3D TASTERŮ, místo toho využívají kalibračního postupu podle kalibrace číselníkových úchylkoměrů. Proto pomocí tohoto kalibračního postupu navrhnu nový pro kalibraci 3D TASTERŮ. Celý kalibrační postup je uveden v příloze H (Návrh pracovního postupu). Zde jenom v krátkosti shrnu, z jakých částí se skládá a jaké nastaly hlavní změny.

Každý kalibrační postup musí mít na začátku, před samotnými kapitolami revizní list, v němž se uvádí, jaké nastaly změny a od kdy tato revize je platná.

#### **Úvodní ustanovení**

První kapitola většinou začíná úvodním ustanovením, v něm se nachází účel a cíl, rozsah platnosti, související dokumenty a zkratky s pojmy. Tady jsem aktualizoval nové normy a předpisy a definoval nové pojmy.

#### **Příprava kalibrace**

V postupu pokračuji kapitolou příprava kalibrace, kde máme podmínky kalibrace, potřeby ke kalibraci, příprava měřicího zařízení, prohlídka měřicího zařízení a funkční zkouška. Zde jsem uvedl nové měřicí zařízení, pomocí kterých se kalibroval 3D TASTER a jak se provádí funkční zkouška u 3D TASTERŮ.

## **Kalibrace**

V kalibraci se uvádí kalibrované parametry, postup kalibrace a na závěr vyhodnocení záznamů o měření. Kalibrace zahrnuje zjištění chyb jak v axiálním, tak i v radiálním směru (ve dvou polohách pootočením o 90°), opakovatelnost a chybu reverzibility. Následuje samotný postup kalibrace, kde se stanovuje, jak by se měla správně provádět kalibrace zmiňovaných parametrů. Ovšem některé 3D TASTERy mají rozdílné cejchování stupnic, tudíž doporučené měřicí kroky v tomto dokumentu lze měnit v závislosti na měřicím rozsahu 3D TASTERu.

Následuje stanovení nejistoty měření, značení, kalibrační list, evidence, záznamy, přílohy a změny - revize. Na závěr kalibračního postupu se v příloze uvádí tabulka dovořených chyb.

Podle tohoto nově navrženého kalibračního postupu, mohlo začít samotné měření s výsledky, které si rozebereme v další kapitole.

## **6 PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ NÁVRHU VČETNĚ VYHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ S VÝSLEDKY STÁVAJÍCÍHO ZPŮSOBU KALIBRACE**

Po zkonstruování nového přípravku a navržení kalibračního postupu pro 3D TASTERy, jsem mohl začít se samotným měření. V následujících podkapitolách budu tyto výsledky měření vyhodnocovat, stanovím nejistotu měření a porovnáím výsledky nově navrženého přípravku se stávajícím. Kalibraci 3D TASTERů jsem prováděl přímo v kalibrační laboratoři dle podmínek stanovených v navrženém kalibračním postupu.

### **6.1 Výsledky naměřených hodnot a vyhodnocení kalibrovaných 3D TASTERů**

Kalibraci měřidel jsem prováděl u dvou typů 3D TASTERů, kvůli porovnání výsledků a celkovému vyhodnocení měření. Použité typy tasterů:

- 3D TASTER Universal - Serial No. 45779 od firmy HAIMER.
- 3D TASTER Universal - evidenční č. 14/008 od firmy HAIMER. Tento typ jsem poté kalibroval i na stávajícím přípravku pro porovnání výsledků.

Postup měření probíhal přesně podle navrženého kalibračního postupu.

#### **6.1.1 Kalibrace 3D TASTERu Universal - Serial No. 45779**

Podle kalibračního postupu jsem nejprve měřil v axiálním směru, kde jsem prováděl měření v celém rozsahu stupnice (od -2 do 2), následovala opakovatelnost a nakonec reverzibilita tasteru. Poté jsem měřil v radiálním směru, podle stejného postupu. Pro přesnost výsledků jsem měřil 10 krát. Z těchto 10 naměřených hodnot jsem zjišťoval aritmetický průměr, odchylku aritmetického průměru od kroku, výběrovou směrodatnou odchylku a nejistota typu A. Tento postup jsem potom prováděl u každého typu měření.

**1) Zjištění chyby při měření v axiálním směru (v ose) - fe**

**a) Vynulování - směr plusové hodnoty (zatěžování)**

**Tab. 6.1** Vynulování (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	$\Delta$ [ $\mu$ m]	s (x) [ $\mu$ m]	$u_A$ [ $\mu$ m]
kroky [mm]														
-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,0000	0,00	0,00	0,00
-1,750	-1,751	-1,753	-1,752	-1,752	-1,753	-1,752	-1,752	-1,752	-1,752	-1,753	-1,7522	-2,20	0,63	0,20
-1,500	-1,499	-1,501	-1,500	-1,499	-1,499	-1,499	-1,499	-1,499	-1,499	-1,500	-1,4994	0,60	0,70	0,22
-1,250	-1,251	-1,253	-1,253	-1,252	-1,252	-1,252	-1,252	-1,252	-1,252	-1,253	-1,2522	-2,20	0,63	0,20
-1,000	-0,999	-1,001	-1,000	-0,999	-0,999	-0,999	-0,999	-0,999	-0,999	-0,999	-0,9993	0,70	0,67	0,21
-0,750	-0,751	-0,753	-0,752	-0,751	-0,751	-0,751	-0,752	-0,752	-0,752	-0,752	-0,7517	-1,70	0,67	0,21
-0,500	-0,499	-0,501	-0,500	-0,499	-0,500	-0,499	-0,499	-0,499	-0,500	-0,500	-0,4996	0,40	0,70	0,22
-0,250	-0,250	-0,252	-0,251	-0,250	-0,251	-0,250	-0,251	-0,250	-0,250	-0,251	-0,2506	-0,60	0,70	0,22
0,000	0,001	-0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,0000	0,00	0,67	0,21
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,00	0,00	0,00
0,250	0,250	0,250	0,251	0,250	0,250	0,251	0,250	0,250	0,251	0,251	0,2504	0,40	0,52	0,16
0,500	0,501	0,501	0,501	0,501	0,501	0,502	0,502	0,502	0,502	0,502	0,5015	1,50	0,53	0,17
0,750	0,751	0,751	0,751	0,751	0,752	0,752	0,752	0,752	0,751	0,753	0,7516	1,60	0,70	0,22
1,000	1,002	1,002	1,002	1,002	1,003	1,003	1,003	1,003	1,003	1,003	1,0026	2,60	0,52	0,16
1,250	1,251	1,251	1,251	1,251	1,251	1,251	1,251	1,250	1,251	1,252	1,2510	1,00	0,47	0,15
1,500	1,502	1,502	1,502	1,502	1,502	1,503	1,503	1,502	1,503	1,503	1,5024	2,40	0,52	0,16
1,750	1,752	1,752	1,752	1,752	1,753	1,753	1,753	1,752	1,753	1,753	1,7525	2,50	0,53	0,17
2,000	2,004	2,004	2,004	2,004	2,004	2,005	2,005	2,005	2,005	2,005	2,0045	4,50	0,53	0,17

Pozn.:  $\bar{x}$  - výběrový (aritmetický) průměr [mm],

$\Delta$  - odchylka aritmetického průměru [ $\mu$ m],

s (x) - výběrová směrodatná odchylka [ $\mu$ m],

$u_A$  - nejistota typu A [ $\mu$ m].

Po dojetí ručičky v pracovním rozsahu z hodnoty -2 na 0, jsem měřící zařízení opět vynuloval a pokračoval dále v pracovním rozsahu na konečnou hodnotu 2. Tento postup byl u všech měření stejný, jen když jsem měřil směr minusové hodnoty, tak v pracovním rozsahu jsem začínal z hodnoty 2 na 0, vynuloval jsem a pokračoval v pracovním rozsahu na hodnotu -2.

Např. vypočtené hodnoty pro krok **-1,250 mm**:

*Výběrový průměr:*

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \bar{x} = \frac{-1,251 + (-1,253) + (-1,253) + (-1,252) + (-1,252) + (-1,252) + (-1,252) + (-1,252) + (-1,252) + (-1,253)}{10} + \frac{-1,252 + (-1,252) + (-1,252) + (-1,253)}{10} \quad \underline{\underline{\bar{x} = -1,2522[\text{mm}]}} \quad (6.1)$$

*Odchylka aritmetického průměru:*

$$\Delta = \bar{x} - \text{krok} \quad \Delta = -1,2522 - (-1,250) \quad \underline{\underline{\Delta = -2,20[\mu\text{m}]}} \quad (6.2)$$

*Výběrová směrodatná odchylka:*

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (-1,251 - (-1,2522))^2 + \dots + (-1,253 - (-1,2522))^2}{(10-1)}} \quad \underline{\underline{s(x) = 0,63[\mu\text{m}]}} \quad (6.3)$$

*Standardní nejistota typu A:*

$$u_A = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \cdot k_a \quad u_A = \frac{0,63}{\sqrt{10}} \cdot 1 \quad \underline{\underline{u_A = 0,20[\mu\text{m}]}} \quad (6.4)$$

Kde: n - počet naměřených hodnot,

$k_a$  - koeficient rozšíření pro pravděpodobnost  $p = \sim 68,3\%$  (pro 10 měření  $k_a = 1$ ).

Takto vzorově vypočtený postup této hodnoty jsem prováděl u každé hodnoty i u dalších tabulek. Legenda k tab. 6.1 je stejná jak u následujících tabulek.

**b) Opakovatelnost - směr plusové hodnoty**

**Tab. 6.2** Opakovatelnost (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,0000	0,47	0,15
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000	-0,0001	0,32	0,10
0,000	0,000	0,001	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000	-0,001	-0,0002	0,63	0,20
0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000	-0,0002	0,42	0,13
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	-0,001	-0,001	0,000	0,000	-0,0001	0,57	0,18

c) Reverzibilita (hystereze) - směr plusové hodnoty

**Tab. 6.3** Reverzibilita (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,001	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,0019	0,32	0,10

2) Zjištění chyby při měření v obou směrech - fges

a) Vynulování - směr minusové hodnoty (odlehčování)

**Tab. 6.4** Vynulování (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	$\Delta$ [μm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]														
2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,0000	0,00	0,00	0,00
1,750	1,747	1,748	1,747	1,748	1,748	1,748	1,748	1,748	1,747	1,748	1,7477	2,30	0,48	0,15
1,500	1,498	1,498	1,498	1,498	1,498	1,497	1,498	1,498	1,498	1,498	1,4979	2,10	0,32	0,10
1,250	1,247	1,247	1,247	1,247	1,248	1,247	1,247	1,248	1,247	1,248	1,2473	2,70	0,48	0,15
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000	0,9999	0,10	0,32	0,10
0,750	0,747	0,747	0,746	0,746	0,747	0,747	0,747	0,747	0,746	0,747	0,7467	3,30	0,48	0,15
0,500	0,497	0,497	0,497	0,497	0,497	0,498	0,497	0,498	0,497	0,497	0,4972	2,80	0,42	0,13
0,250	0,247	0,246	0,247	0,247	0,247	0,247	0,246	0,247	0,247	0,247	0,2468	3,20	0,42	0,13
0,000	-0,003	-0,004	-0,003	-0,003	-0,003	-0,004	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,0032	3,20	0,42	0,13
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,00	0,00	0,00
-0,250	-0,250	-0,250	-0,251	-0,251	-0,251	-0,250	-0,251	-0,250	-0,251	-0,251	-0,2506	0,60	0,52	0,16
-0,500	-0,501	-0,500	-0,501	-0,502	-0,501	-0,500	-0,501	-0,501	-0,501	-0,501	-0,5009	0,90	0,57	0,18
-0,750	-0,752	-0,750	-0,752	-0,752	-0,752	-0,750	-0,752	-0,751	-0,752	-0,752	-0,7515	1,50	0,85	0,27
-1,000	-1,001	-1,000	-1,000	-1,001	-1,001	-0,999	-1,001	-1,001	-1,001	-1,001	-1,0006	0,60	0,70	0,22
-1,250	-1,251	-1,251	-1,252	-1,252	-1,252	-1,250	-1,252	-1,252	-1,252	-1,252	-1,2516	1,60	0,70	0,22
-1,500	-1,500	-1,500	-1,500	-1,501	-1,500	-1,499	-1,500	-1,500	-1,501	-1,500	-1,5001	0,10	0,57	0,18
-1,750	-1,753	-1,753	-1,753	-1,754	-1,754	-1,752	-1,753	-1,753	-1,754	-1,753	-1,7532	3,20	0,63	0,20
-2,000	-2,002	-2,000	-2,001	-2,001	-2,001	-2,001	-2,001	-2,001	-2,001	-2,001	-2,0010	1,00	0,47	0,15

Odchylka aritmetického průměru pro hodnotu 1,000 mm:

$$\Delta = \text{krok} - \bar{x} \quad \Delta = 1,000 - 0,9999 \quad \underline{\underline{\Delta = 0,10[\mu\text{m}]}} \quad (6.5)$$

Tento vzorově vypočtený příklad pro odchylku aritmetického průměru se vypočítá stejně pro všechny neměřené hodnoty, které jsem prováděl ve směru minusových hodnot.

b) Opakovatelnost - směr minusové hodnoty

**Tab. 6.5** Opakovatelnost (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

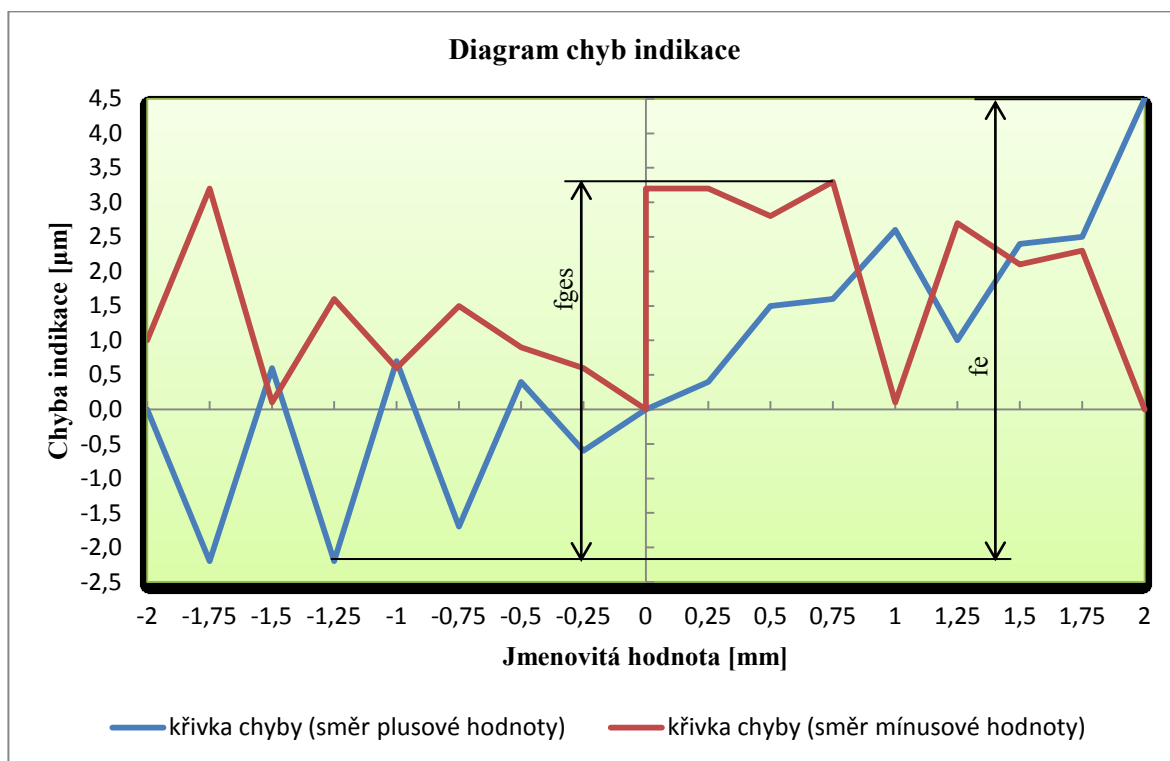
č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	$s(x)$ [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,0001	0,32	0,10
0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,0003	0,48	0,15
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,0002	0,42	0,13
0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,0002	0,42	0,13
0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,0003	0,48	0,15

c) Reverzibilita (hystereze) - směr minusové hodnoty

**Tab. 6.6** Reverzibilita (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	$s(x)$ [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,003	0,0023	0,47	0,15

Z tab. 6.1 a tab. 6.4 jsem udělal diagram chyb indikace. Hodnoty v tomto grafu ve směru plusových hodnot jsem získal odečtením měřícího kroku od aritmetického průměru, viz vzorový příklad (6.2). Naopak ve směru minusových hodnot jsem získal tyto hodnoty odečtením aritmetického průměru od měřícího kroku, viz vzorový příklad (6.5).



**Obr. 6.1** Diagram chyb indikace - axiální směr

Legenda:  $f_e$  - chyba indikace v jednom směru pohybu tyčky doteku,

$f_{ges}$  - chyba indikace (max.) v obou směrech pohybu tyčky doteku,

$$f_e = 2,2 + 4,5 = \mathbf{6,7 \text{ } [\mu m]}$$

$$f_{ges} = 2,2 + 3,3 = \mathbf{5,5 \text{ } [\mu m]}$$

Dovolená chyba s dělením 0,01 mm dle bývalé ČSN 25 1801:

Třída přesnosti 0 => max. dovolená chyba v celém měřicím rozsahu pro 2 je **10 [μm]** =>  **$f_e$  a  $f_{ges}$  vyhovuje.**

Kontrolovaný 3D TASTER Universal má uvedenou přesnost v axiálním i radiálním směru **±0,01 mm** pro opakovatelnost a reverzibilitu. Z tab. 6.2 a z tab. 6.5 je vidět, že opakovatelnost se pohybuje max. v rozmezí **±0,001 mm**, z toho vyplývá, že 3D TASTER v tomto ohledu **vyhovuje**. Z tab. 6.3 a z tab. 6.6 můžeme vyčíst maximální hysterezi, která se pohybuje v rozmezí **-0,002 mm až 0,003 mm**, čili taktéž **vyhovuje**.

### ***3) Stanovení standardní nejistoty typu B v axiálním směru***

Výpočet nejistot se obecně provádí za účelem zjištění metrologických vlastností měřidla. Naměřená hodnota je výsledkem procesu měření, která však nemusí odpovídat skutečné hodnotě. Měřením je získáván jenom odhad skutečné hodnoty, protože měření může být ovlivněno proměnnými podmínkami okolí, měřidlem, nedokonalostí metody měření apod.

Standardní nejistota typu B je stanovena odborným úsudkem na základě všech dostupných informací o variabilitě dané veličiny.

*Zdroje nejistot:*

#### **a) Chyba etalonu hlavice mikrometrické digitální - STINMEYER**

Dle DIN 863-1 dovolená chyba  $z_1 = 0,004 \text{ } [mm]$  – rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení

$$u_{B1} = \frac{z_1}{\sqrt{3}} \cdot c_1 \qquad u_{B1} = \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot 1 \qquad \mathbf{u_{B1} = 2,3094 \text{ } } [\mu m] \qquad \mathbf{(6.6)}$$

Kde:  $c_i$  - koeficient citlivosti

#### **b) Nejistota kalibrace etalonu z kalibračního listu**

Hlavice mikrometrická digitální -  $U_{95} = 0,0015 \text{ } [mm]$  – normální Gaussovo rozdělení



$$u_{B2} = \frac{U_{95}}{2} \cdot c_2 \quad u_{B1} = \frac{1,5}{2} \cdot 1 \quad \mathbf{u_{B2} = 0,7500 [\mu m]} \quad (6.7)$$

c) Nejistota způsobená teplotním rozdílem mezi etalonem a 3D TASTERem

Odhad  $\delta_T = \pm 0,5^\circ\text{C}$  - rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení

$$u_{B3} = \frac{\delta_T}{\sqrt{3}} \cdot \alpha \cdot L \quad u_{B3} = \frac{0,5}{\sqrt{3}} \cdot 11,5 \cdot 0,004 \quad \mathbf{u_{B3} = 0,0133 [\mu m]} \quad (6.8)$$

Kde:  $\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$ ;  $\alpha_1 = \alpha_2 = 11,5 \cdot 10^{-6} \pm 1 \cdot 10^{-6} [K^{-1}]$  - koeficient teplotní

roztlačnosti materiálu etalonu a materiálu 3D TASTERu

L - maximální měřicí rozsah 3D TASTERu [m]

d) Nejistota způsobená vlivem odchylky teploty okolí při kalibraci od  $20^\circ\text{C}$

Odhad  $\delta_{T20} = \pm 1^\circ\text{C}$  - rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení

$$u_{B4} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\delta_{T20}}{\sqrt{3}} \cdot L \quad u_{B4} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 0,004 \quad \mathbf{u_{B4} = 0,0027 [\mu m]} \quad (6.9)$$

Kde:  $\alpha_1 = \alpha_2 = 11,5 \cdot 10^{-6} \pm 1 \cdot 10^{-6} [K^{-1}]$ ;  $\alpha_1 - \alpha_2 = 2 \cdot 10^{-6} [K^{-1}]$

e) Chyba způsobená najížděním na rysky 3D TASTERu

1 dílek = 0,01 [mm]  $\Rightarrow$  odhad  $z_5 = 0,001$  [mm] - rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení

$$u_{B5} = \frac{z_5}{\sqrt{3}} \cdot c_5 \quad u_{B5} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 1 \quad \mathbf{u_{B5} = 0,5774 [\mu m]} \quad (6.10)$$

f) Chyba souososti přípravku – z kontroly funkčních částí přípravku

– normální Gaussovo rozdělení

$$u_{B6} = \frac{z_6}{3} \cdot c_6 \quad u_{B6} = \frac{0}{3} \cdot 1 \quad \mathbf{u_{B6} = 0 [\mu m]} \quad (6.11)$$

g) Výsledná nejistota typu B

$$u_B^2 = u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_{B5}^2 + u_{B6}^2$$

$$u_B = \sqrt{2,3094^2 + 0,75^2 + 0,0133^2 + 0,0027^2 + 0,5774^2 + 0^2} \quad \mathbf{u_B = 2,4959 [\mu m]} \quad (6.12)$$

#### h) Kombinovaná standardní nejistota

Nejistotu typu A volím tu největší z předchozích tab. 6.1 až 6.6  $\Rightarrow u_A = 0,27 \text{ } [\mu\text{m}]$

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad u_c = \sqrt{0,27^2 + 2,4959^2} \quad u_c = 2,5105 \text{ } [\mu\text{m}] \quad (6.13)$$

#### i) Rozšířená nejistota měření pro pravděpodobnost $\sim 95\%$

$$U = k \cdot u_c \quad U = 2 \cdot 2,5105 \quad U = 5,0210 \text{ } [\mu\text{m}] \quad (6.14)$$

Např. pro hodnotu **0,250 mm** - směr minusové hodnoty:

$$\Delta = 0,0032 \pm 0,005 \text{ } [\text{mm}]$$

Legendy k těmto vzorcům jsou ve všech dalších výpočtech standardních nejistot stejné.

#### **4) Zjištění chyby při měření v radiálním směru (kolmo na osu): najetí proti číselníku snímacímu doteku - fe**

##### a) Vynulování - směr plusové hodnoty

**Tab. 6.7** Vynulování (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	$\Delta$ [ $\mu\text{m}$ ]	s (x) [ $\mu\text{m}$ ]	$u_A$ [ $\mu\text{m}$ ]
kroky [mm]														
-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,0000	0,0	0,00	0,00
-1,750	-1,749	-1,748	-1,749	-1,750	-1,750	-1,750	-1,748	-1,750	-1,750	-1,749	-1,7493	0,7	0,82	0,26
-1,500	-1,503	-1,505	-1,504	-1,505	-1,505	-1,503	-1,503	-1,504	-1,504	-1,504	-1,5040	-4,0	0,82	0,26
-1,250	-1,257	-1,258	-1,259	-1,258	-1,259	-1,259	-1,257	-1,258	-1,259	-1,259	-1,2583	-8,3	0,82	0,26
-1,000	-1,007	-1,008	-1,007	-1,008	-1,009	-1,008	-1,007	-1,007	-1,008	-1,008	-1,0077	-7,7	0,67	0,21
-0,750	-0,761	-0,763	-0,762	-0,763	-0,763	-0,763	-0,761	-0,761	-0,762	-0,761	-0,7620	-12,0	0,94	0,30
-0,500	-0,514	-0,513	-0,514	-0,513	-0,515	-0,514	-0,513	-0,513	-0,514	-0,513	-0,5136	-13,6	0,70	0,22
-0,250	-0,262	-0,263	-0,264	-0,263	-0,264	-0,264	-0,262	-0,262	-0,262	-0,262	-0,2628	-12,8	0,92	0,29
0,000	-0,008	-0,008	-0,009	-0,009	-0,010	-0,009	-0,008	-0,009	-0,009	-0,009	-0,0088	-8,8	0,63	0,20
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,0	0,00	0,00
0,250	0,251	0,250	0,250	0,252	0,251	0,251	0,251	0,252	0,251	0,251	0,2510	1,0	0,67	0,21
0,500	0,504	0,505	0,506	0,506	0,505	0,505	0,505	0,505	0,505	0,504	0,5050	5,0	0,67	0,21
0,750	0,764	0,766	0,766	0,766	0,766	0,765	0,766	0,766	0,765	0,765	0,7655	15,5	0,71	0,22
1,000	1,022	1,023	1,024	1,023	1,023	1,022	1,023	1,023	1,023	1,023	1,0229	22,9	0,57	0,18
1,250	1,278	1,279	1,279	1,278	1,279	1,280	1,279	1,279	1,279	1,280	1,2790	29,0	0,67	0,21
1,500	1,537	1,536	1,538	1,537	1,537	1,536	1,537	1,537	1,536	1,537	1,5368	36,8	0,63	0,20
1,750	1,805	1,804	1,804	1,804	1,805	1,804	1,805	1,806	1,805	1,804	1,8046	54,6	0,70	0,22
2,000	2,070	2,069	2,070	2,069	2,070	2,069	2,070	2,070	2,070	2,069	2,0696	69,6	0,52	0,16

b) Opakovatelnost - směr plusové hodnoty

**Tab. 6.8** Opakovatelnost (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření											$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.			
0,000	0,001	0,001	0,002	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,0007	0,67	0,21
0,000	0,002	0,001	0,001	0,002	0,000	0,002	0,000	0,001	0,002	0,000	0,0011	0,88	0,28
0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,002	0,000	0,0006	0,70	0,22
0,000	0,000	0,001	0,002	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,0006	0,70	0,22
0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,0006	0,52	0,16

c) Reverzibilita (hystereze) - směr plusové hodnoty

**Tab. 6.9** Reverzibilita (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření											$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.			
0,000	0,015	0,015	0,015	0,016	0,015	0,016	0,015	0,016	0,015	0,015	0,0153	0,48	0,15

### 5) Zjištění chyby při měření v obou směrech - fges

#### a) Vynulování - směr minusové hodnoty

**Tab. 6.10** Vynulování (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	$\Delta$ [μm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]														
2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,0000	0,0	0,00	0,00
1,750	1,736	1,735	1,735	1,737	1,736	1,737	1,736	1,736	1,737	1,737	1,7362	13,8	0,79	0,25
1,500	1,468	1,468	1,469	1,470	1,470	1,470	1,469	1,470	1,470	1,470	1,4694	30,6	0,84	0,27
1,250	1,209	1,207	1,208	1,209	1,208	1,208	1,209	1,209	1,207	1,208	1,2082	41,8	0,79	0,25
1,000	0,952	0,951	0,952	0,950	0,950	0,950	0,951	0,950	0,950	0,950	0,9506	49,4	0,84	0,27
0,750	0,693	0,691	0,692	0,691	0,691	0,691	0,692	0,691	0,691	0,692	0,6915	58,5	0,71	0,22
0,500	0,429	0,429	0,430	0,429	0,430	0,428	0,429	0,428	0,428	0,429	0,4289	71,1	0,74	0,23
0,250	0,176	0,175	0,176	0,174	0,174	0,175	0,174	0,175	0,174	0,176	0,1749	75,1	0,88	0,28
0,000	-0,079	-0,081	-0,080	-0,081	-0,081	-0,081	-0,080	-0,081	-0,080	-0,080	-0,0804	80,4	0,70	0,22
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,0	0,00	0,00
-0,250	-0,253	-0,252	-0,251	-0,252	-0,252	-0,251	-0,253	-0,252	-0,252	-0,251	-0,2519	1,9	0,74	0,23
-0,500	-0,507	-0,506	-0,506	-0,505	-0,506	-0,504	-0,506	-0,505	-0,505	-0,505	-0,5055	5,5	0,85	0,27
-0,750	-0,754	-0,752	-0,754	-0,751	-0,751	-0,751	-0,753	-0,753	-0,753	-0,752	-0,7524	2,4	1,17	0,37
-1,000	-1,002	-0,999	-1,001	-0,999	-0,998	-0,999	-0,999	-0,999	-0,999	-0,999	-0,9994	-0,6	1,17	0,37
-1,250	-1,249	-1,246	-1,249	-1,246	-1,246	-1,247	-1,247	-1,248	-1,248	-1,248	-1,2474	-2,6	1,17	0,37
-1,500	-1,488	-1,487	-1,489	-1,488	-1,488	-1,487	-1,489	-1,488	-1,489	-1,488	-1,4881	-11,9	0,74	0,23
-1,750	-1,733	-1,733	-1,733	-1,731	-1,731	-1,732	-1,732	-1,731	-1,732	-1,733	-1,7321	-17,9	0,88	0,28
-2,000	-1,977	-1,974	-1,974	-1,974	-1,973	-1,973	-1,976	-1,974	-1,975	-1,974	-1,9744	-25,6	1,26	0,40

#### b) Opakovatelnost - směr minusové hodnoty

**Tab. 6.11** Opakovatelnost (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

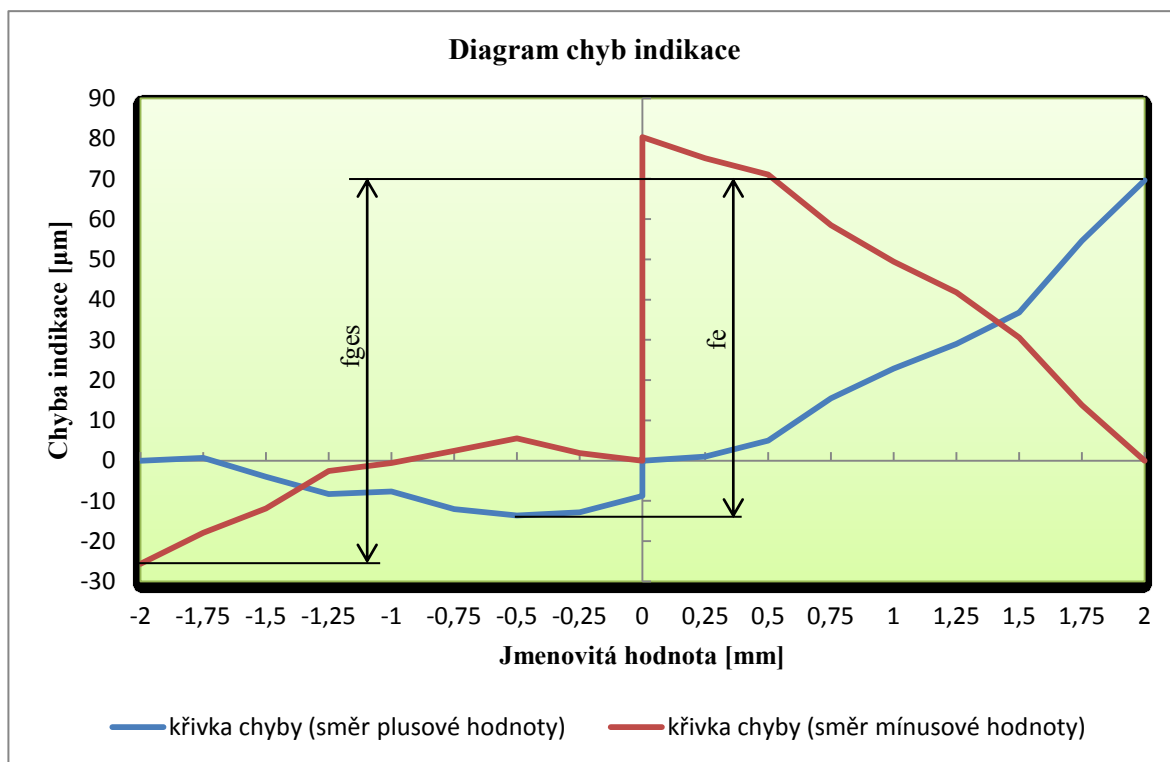
č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	-0,001	-0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,001	0,0000	0,82	0,26
0,000	0,000	0,000	-0,001	-0,001	-0,001	0,001	-0,001	0,000	0,001	0,000	-0,0002	0,79	0,25
0,000	0,000	-0,001	0,000	-0,001	0,000	-0,001	-0,001	0,001	0,000	0,000	-0,0003	0,67	0,21
0,000	0,000	-0,001	-0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	-0,001	0,001	-0,001	-0,0001	0,88	0,28
0,000	-0,001	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,000	-0,001	0,001	0,000	-0,0002	0,63	0,20

#### c) Reverzibilita (hystereze) - směr minusové hodnoty

**Tab. 6.12** Reverzibilita (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	-0,012	-0,013	-0,013	-0,013	-0,012	-0,013	-0,012	-0,013	-0,012	-0,012	-0,0125	0,53	0,17

Z tab. 6.7 a tab. 6.10 jsem opět udělal diagram chyb indikace. Hodnoty v tomto grafu ve směru plusových hodnot jsem získal odečtením měřicího kroku od aritmetického průměru, viz vzorový příklad (6.2). Naopak ve směru minusových hodnot jsem získal tyto hodnoty odečtením aritmetického průměru od měřicího kroku, viz vzorový příklad (6.5).



**Obr. 6.2** Diagram chyb indikace - radiální směr (proti číselníku)

$$f_e = 13,6 + 69,6 = 83,2 \text{ } [\mu\text{m}]$$

$$f_{ges} = 25,6 + 69,6 = 95,2 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Dovolená chyba s dělením 0,01 mm dle bývalé ČSN 25 1801:

Třída přesnosti 2 => max. dovolená chyba v celém měřicím rozsahu pro 2 je **14 [ $\mu\text{m}$ ]** => ***f<sub>e</sub> a f<sub>ges</sub> nevyhovuje.***

Kontrolovaný 3D TASTER Universal má uvedenou přesnost v axiálním i radiálním směru  **$\pm 0,01 \text{ mm}$**  pro opakovatelnost a reverzibilitu. Z tab. 6.8 a z tab. 6.11 je vidět, že opakovatelnost se pohybuje max. v rozmezí **-0,001 mm až 0,002 mm**, z toho vyplývá, že 3D TASTER v tomto ohledu **vyhovuje**. Z tab. 6.9 a z tab. 6.12 můžeme vyčíst maximální hysterezi, která se pohybuje v rozmezí **-0,013 mm až 0,016 mm**, čili **nevyhovuje**.

**6) Zjištění chyby při měření v radiálním směru (kolmo na osu): najetí proti boku číselníku snímacího doteku (pootočení o 90°) - fe**

**a) Vynulování - směr plusové hodnoty**

**Tab. 6.13** Vynulování (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	$\Delta$ [μm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]														
-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,0000	0,0	0,00	0,00
-1,750	-1,752	-1,752	-1,754	-1,753	-1,753	-1,752	-1,753	-1,752	-1,753	-1,752	-1,7526	-2,6	0,70	0,22
-1,500	-1,506	-1,505	-1,507	-1,506	-1,505	-1,505	-1,505	-1,505	-1,506	-1,505	-1,5055	-5,5	0,71	0,22
-1,250	-1,261	-1,260	-1,262	-1,262	-1,260	-1,260	-1,260	-1,260	-1,261	-1,260	-1,2606	-10,6	0,84	0,27
-1,000	-1,014	-1,013	-1,015	-1,014	-1,013	-1,013	-1,013	-1,013	-1,014	-1,014	-1,0136	-13,6	0,70	0,22
-0,750	-0,769	-0,768	-0,770	-0,769	-0,768	-0,768	-0,769	-0,768	-0,768	-0,768	-0,7685	-18,5	0,71	0,22
-0,500	-0,517	-0,518	-0,519	-0,518	-0,517	-0,517	-0,517	-0,517	-0,518	-0,517	-0,5175	-17,5	0,71	0,22
-0,250	-0,264	-0,264	-0,266	-0,265	-0,264	-0,264	-0,264	-0,265	-0,264	-0,265	-0,2645	-14,5	0,71	0,22
0,000	-0,016	-0,015	-0,017	-0,017	-0,016	-0,015	-0,015	-0,015	-0,015	-0,016	-0,0157	-15,7	0,82	0,26
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,0	0,00	0,00
0,250	0,254	0,254	0,254	0,256	0,255	0,254	0,253	0,254	0,254	0,254	0,2542	4,2	0,79	0,25
0,500	0,512	0,510	0,511	0,511	0,512	0,511	0,510	0,510	0,510	0,512	0,5109	10,9	0,88	0,28
0,750	0,769	0,768	0,768	0,769	0,769	0,768	0,768	0,767	0,768	0,769	0,7683	18,3	0,67	0,21
1,000	1,025	1,023	1,024	1,026	1,025	1,024	1,023	1,024	1,023	1,025	1,0242	24,2	1,03	0,33
1,250	1,283	1,281	1,282	1,284	1,282	1,280	1,282	1,281	1,282	1,282	1,2819	31,9	1,10	0,35
1,500	1,544	1,544	1,544	1,544	1,543	1,542	1,542	1,543	1,543	1,543	1,5432	43,2	0,79	0,25
1,750	1,806	1,806	1,806	1,807	1,807	1,805	1,806	1,805	1,805	1,807	1,8060	56,0	0,82	0,26
2,000	2,069	2,069	2,069	2,069	2,069	2,069	2,069	2,068	2,069	2,070	2,0690	69,0	0,47	0,15

**b) Opakovatelnost - směr plusové hodnoty**

**Tab. 6.14** Opakovatelnost (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	0,001	-0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	-0,001	0,001	0,000	-0,001	0,0001	0,88	0,28
0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	-0,001	0,000	-0,001	0,001	0,0001	0,74	0,23
0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	-0,001	0,000	0,001	-0,001	0,000	0,0002	0,79	0,25
0,000	-0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000	-0,001	0,000	-0,0001	0,74	0,23
0,000	0,000	-0,001	-0,001	-0,001	0,000	0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000	-0,0003	0,67	0,21

c) Reverzibilita (hystereze) - směr plusové hodnoty

**Tab. 6.15** Reverzibilita (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	0,016	0,016	0,015	0,016	0,015	0,015	0,015	0,016	0,015	0,015	0,0154	0,52	0,16

7) Zjištění chyby při měření v obou směrech - fges

a) Vynulování - směr minusové hodnoty

**Tab. 6.16** Vynulování (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	$\Delta$ [μm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]														
2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,0000	0,0	0,00	0,00
1,750	1,737	1,737	1,737	1,737	1,738	1,736	1,737	1,737	1,737	1,736	1,7369	13,1	0,57	0,18
1,500	1,469	1,470	1,471	1,470	1,471	1,470	1,471	1,470	1,470	1,470	1,4702	29,8	0,63	0,20
1,250	1,210	1,209	1,208	1,210	1,210	1,209	1,209	1,208	1,209	1,208	1,2090	41,0	0,82	0,26
1,000	0,953	0,952	0,951	0,953	0,953	0,952	0,951	0,951	0,952	0,951	0,9519	48,1	0,88	0,28
0,750	0,696	0,695	0,694	0,694	0,694	0,694	0,695	0,694	0,694	0,694	0,6944	55,6	0,70	0,22
0,500	0,436	0,436	0,434	0,436	0,435	0,434	0,435	0,434	0,434	0,434	0,4348	65,2	0,92	0,29
0,250	0,179	0,180	0,181	0,179	0,179	0,179	0,180	0,179	0,179	0,179	0,1794	70,6	0,70	0,22
0,000	-0,075	-0,074	-0,073	-0,075	-0,075	-0,075	-0,074	-0,075	-0,075	-0,075	-0,0746	74,6	0,70	0,22
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,0	0,00	0,00
-0,250	-0,249	-0,249	-0,249	-0,249	-0,249	-0,249	-0,249	-0,249	-0,249	-0,249	-0,2490	-1,0	0,00	0,00
-0,500	-0,501	-0,502	-0,502	-0,501	-0,500	-0,502	-0,502	-0,501	-0,501	-0,502	-0,5014	1,4	0,70	0,22
-0,750	-0,749	-0,751	-0,750	-0,750	-0,750	-0,750	-0,751	-0,749	-0,749	-0,750	-0,7499	-0,1	0,74	0,23
-1,000	-0,998	-1,000	-0,999	-0,997	-0,998	-0,998	-0,999	-0,997	-0,998	-0,998	-0,9982	-1,8	0,92	0,29
-1,250	-1,245	-1,245	-1,246	-1,243	-1,244	-1,245	-1,246	-1,244	-1,243	-1,244	-1,2445	-5,5	1,08	0,34
-1,500	-1,491	-1,491	-1,491	-1,489	-1,490	-1,491	-1,491	-1,491	-1,491	-1,490	-1,4906	-9,4	0,70	0,22
-1,750	-1,737	-1,737	-1,737	-1,735	-1,737	-1,736	-1,736	-1,736	-1,736	-1,735	-1,7362	-13,8	0,79	0,25
-2,000	-1,984	-1,985	-1,984	-1,982	-1,983	-1,982	-1,983	-1,982	-1,982	-1,983	-1,9830	-17,0	1,05	0,33

b) Opakovatelnost - směr minusové hodnoty

**Tab. 6.17** Opakovatelnost (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

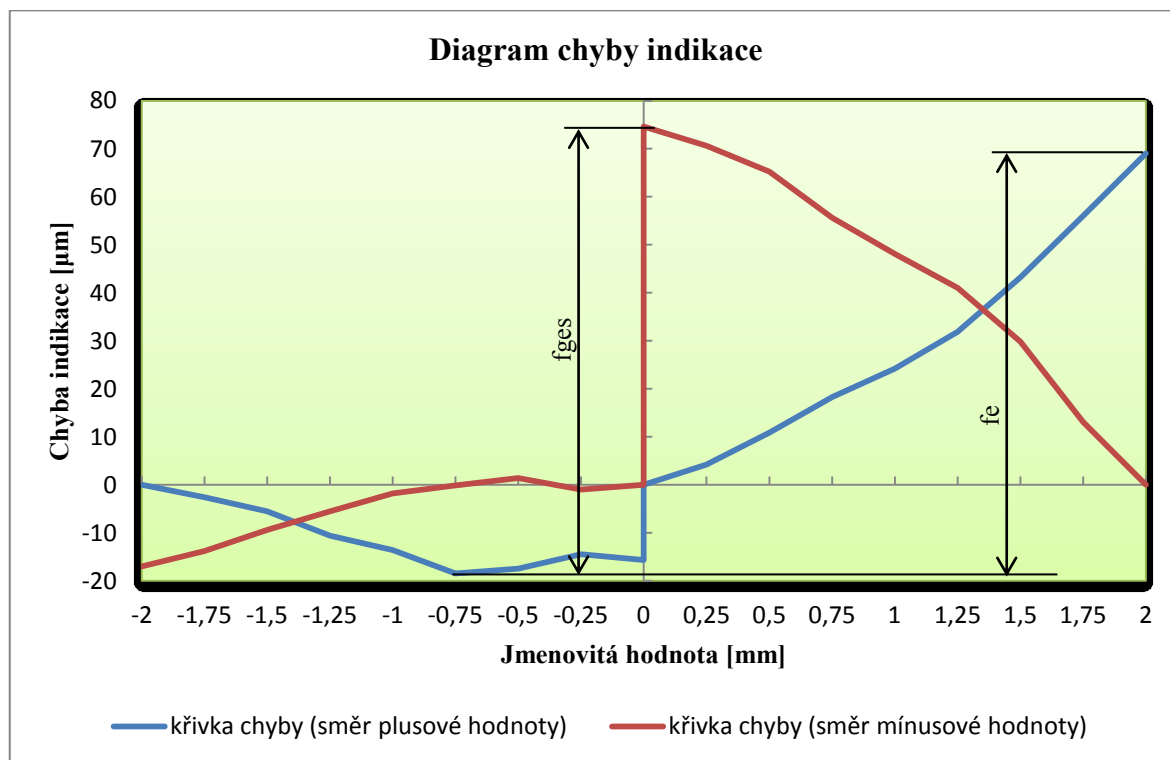
č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	$s(x)$ [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	0,000	-0,001	0,001	-0,001	0,000	-0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,0001	0,88	0,28
0,000	0,000	-0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,0003	0,67	0,21
0,000	0,001	-0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,0004	0,70	0,22
0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	-0,001	-0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,0001	0,74	0,23
0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	-0,001	0,000	0,0002	0,63	0,20

c) Reverzibilita (hystereze) - směr minusové hodnoty

**Tab. 6.18** Reverzibilita (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	$s(x)$ [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	-0,013	-0,014	-0,013	-0,014	-0,013	-0,013	-0,014	-0,013	-0,013	-0,014	-0,0134	0,52	0,16

Z tab. 6.13 a tab. 6.16 jsem opět udělal diagram chyb indikace. Hodnoty v tomto grafu ve směru plusových hodnot jsem získal odečtením měřicího kroku od aritmetického průměru, viz vzorový příklad (6.2). Naopak ve směru minusových hodnot jsem získal tyto hodnoty odečtením aritmetického průměru od měřicího kroku, viz vzorový příklad (6.5).



**Obr. 6.3** Diagram chyb indikace - radiální směr (pootočení o 90°)



$$f_e = 18,5 + 69 = \mathbf{87,5 \text{ } [\mu m]}$$

$$f_{ges} = 18,5 + 74,6 = \mathbf{93,1 \text{ } [\mu m]}$$

Dovolená chyba s dělením 0,01 mm dle bývalé ČSN 25 1801:

Třída přesnosti 2 => max. dovolená chyba v celém měřicím rozsahu pro 2 je **14 [μm]** => ***f<sub>e</sub>* a *f<sub>ges</sub>* nevyhovuje.**

Kontrolovaný 3D TASTER Universal má uvedenou přesnost v axiálním i radiálním směru **±0,01 mm** pro opakovatelnost a reverzibilitu. Z tab. 6.14 a z tab. 6.17 je vidět, že opakovatelnost se pohybuje max. v rozmezí **±0,001 mm**, z toho vyplývá, že 3D TASTER v tomto ohledu **vyhovuje**. Z tab. 6.15 a z tab. 6.18 můžeme vyčíst maximální hysterezi, která se pohybuje v rozmezí **-0,014 mm až 0,016 mm**, čili **nevyhovuje**.

### ***8) Stanovení standardní nejistoty typu B v radiálním směru***

*Zdroje nejistot:*

#### **a) Chyba etalonu číselníkový úchylkoměr digitální MAHR 1075R**

Dle DIN 863-1 dovolená chyba  $z_1 = 0,005 \text{ } [mm]$  – rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení

$$u_{B1} = \frac{z_1}{\sqrt{3}} \cdot c_1 \qquad u_{B1} = \frac{5}{\sqrt{3}} \cdot 1 \qquad \mathbf{u_{B1} = 2,8868 \text{ } } [\mu m]$$

#### **b) Nejistota kalibrace etalonu z kalibračního listu**

Hlavice mikrometrická digitální -  $U_{95} = 0,002 \text{ } [mm]$  – normální Gaussovo rozdělení

$$u_{B2} = \frac{U_{95}}{2} \cdot c_2 \qquad u_{B1} = \frac{2}{2} \cdot 1 \qquad \mathbf{u_{B2} = 1,0000 \text{ } } [\mu m]$$

#### **c) Nejistota způsobená teplotním rozdílem mezi etalonem a 3D TASTERem**

Odhad  $\delta_T = \pm 0,5^\circ C$  - rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení

$$u_{B3} = \frac{\delta_T}{\sqrt{3}} \cdot \alpha \cdot L \qquad u_{B3} = \frac{0,5}{\sqrt{3}} \cdot 11,5 \cdot 0,004 \qquad \mathbf{u_{B3} = 0,0133 \text{ } } [\mu m]$$

#### **d) Nejistota způsobená vlivem odchylky teploty okolí při kalibraci od 20°C**

Odhad  $\delta_{T20} = \pm 1^\circ C$  - rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení

$$u_{B4} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\delta_{T20}}{\sqrt{3}} \cdot L \quad u_{B4} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 0,004 \quad \mathbf{u_{B4} = 0,0027 [\mu m]}$$

e) Chyba způsobená najížděním na rysky 3D TASTERu

1 dílek = 0,01 [mm] => odhad  $z_5 = 0,001$  [mm] - rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení

$$u_{B5} = \frac{z_5}{\sqrt{3}} \cdot c_5 \quad u_{B5} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 1 \quad \mathbf{u_{B5} = 0,5774 [\mu m]}$$

f) Chyba souososti přípravku – z kontroly funkčních částí přípravku

– normální Gaussovo rozdělení

$$u_{B6} = \frac{z_6}{3} \cdot c_6 \quad u_{B6} = \frac{10}{3} \cdot 1 \quad \mathbf{u_{B6} = 3,3333 [\mu m]}$$

g) Výsledná nejistota typu B

$$u_B^2 = u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_{B5}^2 + u_{B6}^2$$

$$u_B = \sqrt{2,8868^2 + 1^2 + 0,0133^2 + 0,0027^2 + 0,5774^2 + 3,3333^2} \quad \mathbf{u_B = 4,5583 [\mu m]}$$

h) Kombinovaná standardní nejistota

Nejistotu typu A volím tu největší z předchozích tab. 6.7 až 6.18 =>  $u_A = 0,40$  [μm]

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad u_c = \sqrt{0,40^2 + 4,5583^2} \quad \mathbf{u_c = 4,5758 [\mu m]}$$

i) Rozšířená nejistota měření pro pravděpodobnost ~ 95%

$$U = k \cdot u_c \quad U = 2 \cdot 4,5758 \quad \mathbf{U = 9,1516 [\mu m]}$$

Např. pro hodnotu **1,750 mm** - najetí proti číselníku - směr plusové hodnoty:

$$\mathbf{\Delta = 0,0546 \pm 0,009 [mm]}$$

Závěrem bych řekl, že zde kalibrovaný 3D TASTER Universal Serial No. 45779 je v axiálním směru přesný a zcela vyhovuje. Naopak v radiálním směru vyhovuje pouze opakovatelnost. Reverzibilita nevyhovuje pouze o 0,006 mm, což se dá přesnějším seřízením opravit. Jde poznat, že tento 3D TASTER je nový, dosud nepoužitý.

Problém nastává v radiálním směru při procházení pracovního rozsahu, kde 3D TASTER vůbec nevyhovuje a dosahuje enormně vysokého vychýlení. Po řadě úvah a nastudování co nejvíce informací o 3D TASTERech, jsem došel k výsledku, že měření v pracovním rozsahu

v radiálním směru nemá význam, protože tastery slouží hlavně k určení nulového bodu na obrobku, určení středu otvoru, určení a korekci ustavení obrobku a pro měření délky a hloubky. Stupnice slouží především k tomu, aby nedošlo k poškození snímacího doteku po přesáhnutí hranic -2 a 2 mm.

Proto následující kalibrované 3D TASTERy, jsem pro porovnání výsledků měřil v axiálním směru beze změn, ale v radiálním směru jsem měřil pouze opakovatelnost a reverzibilitu. Zkoušel jsem měřit v radiálním směru i u jiných typů 3D TASTERů (viz příloha A a příloha B), ale všude nastával stejný problém, proto jsem se rozhodl, že to nemá význam.

### 6.1.2 Kalibrace 3D TASTER Universal - evidenční č. 14/008

Postup byl beze změn stejný, jak u předchozího 3D TASTERu. Nejprve jsem tedy měřil v axiálním směru.

#### 1) Zjištění chyby při měření v axiálním směru (v ose) - fe

##### a) Vynulování - směr plusové hodnoty (zatěžování)

**Tab. 6.19** Vynulování (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	$\Delta$ [μm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]														
-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,0000	0,00	0,00	0,00
-1,750	-1,751	-1,753	-1,751	-1,751	-1,752	-1,752	-1,752	-1,751	-1,751	-1,752	-1,7516	-1,60	0,70	0,22
-1,500	-1,500	-1,501	-1,501	-1,500	-1,501	-1,501	-1,500	-1,500	-1,501	-1,500	-1,5005	-0,50	0,53	0,17
-1,250	-1,249	-1,250	-1,250	-1,250	-1,249	-1,249	-1,249	-1,249	-1,250	-1,249	-1,2494	0,60	0,52	0,16
-1,000	-1,001	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000	-1,001	-1,001	-1,000	-1,000	-1,000	-1,0003	-0,30	0,48	0,15
-0,750	-0,748	-0,749	-0,748	-0,748	-0,749	-0,750	-0,748	-0,749	-0,748	-0,749	-0,7486	1,40	0,70	0,22
-0,500	-0,497	-0,498	-0,498	-0,498	-0,498	-0,498	-0,497	-0,497	-0,498	-0,498	-0,4977	2,30	0,48	0,15
-0,250	-0,248	-0,249	-0,250	-0,248	-0,250	-0,249	-0,249	-0,248	-0,248	-0,249	-0,2488	1,20	0,79	0,25
0,000	0,004	0,004	0,003	0,004	0,003	0,003	0,005	0,004	0,004	0,004	0,0038	3,80	0,63	0,20
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,00	0,00	0,00
0,250	0,247	0,248	0,249	0,247	0,248	0,249	0,247	0,249	0,249	0,250	0,2483	-1,70	1,06	0,33
0,500	0,504	0,503	0,505	0,504	0,504	0,504	0,503	0,504	0,504	0,503	0,5038	3,80	0,63	0,20
0,750	0,753	0,752	0,754	0,753	0,753	0,753	0,752	0,754	0,753	0,752	0,7529	2,90	0,74	0,23
1,000	1,002	1,002	1,002	1,002	1,003	1,002	1,001	1,002	1,002	1,003	1,0021	2,10	0,57	0,18
1,250	1,252	1,250	1,253	1,251	1,251	1,251	1,250	1,250	1,251	1,250	1,2509	0,90	0,99	0,31
1,500	1,501	1,500	1,502	1,501	1,501	1,500	1,499	1,501	1,501	1,501	1,5007	0,70	0,82	0,26
1,750	1,755	1,754	1,755	1,755	1,755	1,755	1,753	1,754	1,755	1,753	1,7544	4,40	0,84	0,27
2,000	2,006	2,005	2,006	2,006	2,005	2,005	2,004	2,005	2,005	2,004	2,0051	5,10	0,74	0,23

b) Opakovatelnost - směr plusové hodnoty

**Tab. 6.20** Opakovatelnost (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření											$\bar{x}$ [mm]	$s(x)$ [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.			
0,000	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,0002	0,63	0,20
0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,0005	0,53	0,17
0,000	-0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,0004	0,70	0,22
0,000	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,0003	0,67	0,21
0,000	-0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,0001	0,74	0,23

c) Reverzibilita (hystereze) - směr plusové hodnoty

**Tab. 6.21** Reverzibilita (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření											$\bar{x}$ [mm]	$s(x)$ [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.			
0,000	0,003	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002	0,0023	0,48	0,15

## 2) Zjištění chyby při měření v obou směrech - fges

### a) Vynulování - směr minusové hodnoty (odlehčování)

**Tab. 6.22** Vynulování (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	$\Delta$ [ $\mu\text{m}$ ]	s (x) [ $\mu\text{m}$ ]	$u_A$ [ $\mu\text{m}$ ]
kroky [mm]														
2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,0000	0,00	0,00	0,00
1,750	1,745	1,744	1,745	1,745	1,746	1,744	1,746	1,747	1,745	1,746	1,7453	4,70	0,95	0,30
1,500	1,492	1,493	1,492	1,492	1,493	1,492	1,494	1,494	1,493	1,494	1,4929	7,10	0,88	0,28
1,250	1,242	1,242	1,241	1,241	1,243	1,241	1,243	1,243	1,242	1,244	1,2422	7,80	1,03	0,33
1,000	0,993	0,994	0,994	0,993	0,995	0,993	0,995	0,995	0,994	0,995	0,9941	5,90	0,88	0,28
0,750	0,742	0,743	0,743	0,743	0,744	0,743	0,744	0,745	0,743	0,744	0,7434	6,60	0,84	0,27
0,500	0,495	0,497	0,496	0,495	0,498	0,496	0,497	0,498	0,496	0,498	0,4966	3,40	1,17	0,37
0,250	0,240	0,242	0,240	0,241	0,243	0,241	0,242	0,243	0,241	0,242	0,2415	8,50	1,08	0,34
0,000	-0,007	-0,007	-0,007	-0,008	-0,006	-0,007	-0,006	-0,006	-0,007	-0,006	-0,0067	6,70	0,67	0,21
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,00	0,00	0,00
-0,250	-0,254	-0,253	-0,254	-0,253	-0,253	-0,253	-0,253	-0,253	-0,253	-0,252	-0,2531	3,10	0,57	0,18
-0,500	-0,503	-0,503	-0,504	-0,503	-0,503	-0,503	-0,503	-0,502	-0,503	-0,503	-0,5030	3,00	0,47	0,15
-0,750	-0,756	-0,755	-0,755	-0,754	-0,754	-0,754	-0,754	-0,754	-0,754	-0,754	-0,7544	4,40	0,70	0,22
-1,000	-1,005	-1,005	-1,005	-1,003	-1,004	-1,003	-1,004	-1,003	-1,004	-1,004	-1,0040	4,00	0,82	0,26
-1,250	-1,254	-1,253	-1,255	-1,254	-1,253	-1,254	-1,254	-1,253	-1,254	-1,254	-1,2538	3,80	0,63	0,20
-1,500	-1,505	-1,505	-1,505	-1,504	-1,504	-1,504	-1,504	-1,503	-1,504	-1,503	-1,5041	4,10	0,74	0,23
-1,750	-1,757	-1,757	-1,758	-1,758	-1,757	-1,757	-1,757	-1,756	-1,757	-1,756	-1,7570	7,00	0,67	0,21
-2,000	-2,004	-2,005	-2,004	-2,004	-2,004	-2,003	-2,003	-2,003	-2,003	-2,004	-2,0037	3,70	0,67	0,21

### b) Opakovatelnost - směr minusové hodnoty

**Tab. 6.23** Opakovatelnost (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

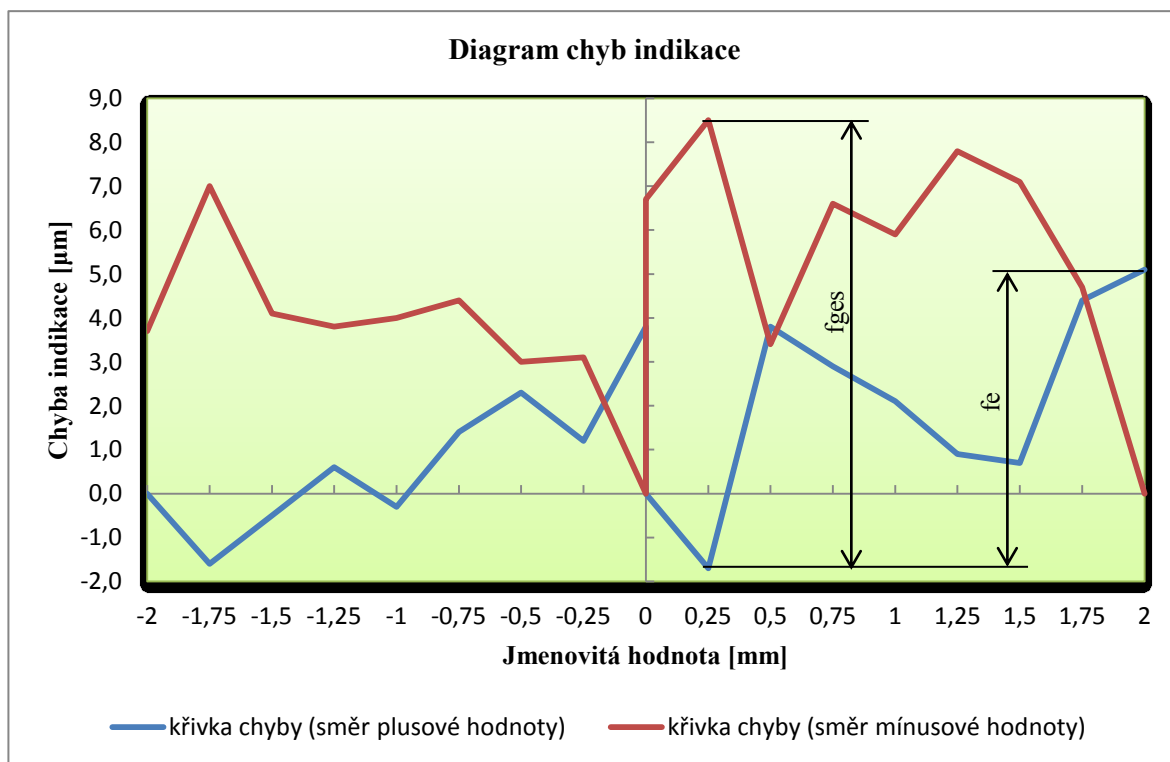
č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [ $\mu\text{m}$ ]	$u_A$ [ $\mu\text{m}$ ]
kroky [mm]													
0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	-0,001	0,0002	0,63	0,20
0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	-0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,0002	0,63	0,20
0,000	0,000	-0,001	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,001	-0,001	0,001	0,000	-0,0001	0,74	0,23
0,000	0,000	-0,001	-0,001	0,001	-0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	-0,001	-0,0001	0,88	0,28
0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,0001	0,57	0,18

### c) Reverzibilita (hystereze) - směr minusové hodnoty

**Tab. 6.24** Reverzibilita (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [ $\mu\text{m}$ ]	$u_A$ [ $\mu\text{m}$ ]
kroky [mm]													
0,000	-0,004	-0,004	-0,003	-0,003	-0,004	-0,004	-0,003	-0,003	-0,004	-0,004	-0,0036	0,52	0,16

Z tab. 6.19 a tab. 6.22 jsem opět udělal diagram chyb indikace. Hodnoty v tomto grafu ve směru plusových hodnot jsem získal odečtením měřicího kroku od aritmetického průměru, viz vzorový příklad (6.2). Naopak ve směru minusových hodnot jsem získal tyto hodnoty odečtením aritmetického průměru od měřicího kroku, viz vzorový příklad (6.5).



**Obr. 6.4** Diagram chyb indikace - axiální směr

$$f_e = 1,7 + 5,1 = 6,8 \text{ } [\mu\text{m}]$$

$$f_{ges} = 0,0 + 8,5 = 8,5 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Dovolená chyba s dělením 0,01 mm dle bývalé ČSN 25 1801:

Třída přesnosti 0 => max. dovolená chyba v celém měřicím rozsahu pro 2 je **10 [ $\mu\text{m}$ ]** => ***f<sub>e</sub>* a *f<sub>ges</sub>* vyhovuje.**

Kontrolovaný 3D TASTER Universal má uvedenou přesnost v axiálním i radiálním směru  **$\pm 0,01 \text{ mm}$**  pro opakovatelnost a reverzibilitu. Z tab. 6.20 a z tab. 6.23 je vidět, že opakovatelnost se pohybuje max. v rozmezí  **$\pm 0,001 \text{ mm}$** , z toho vyplývá, že 3D TASTER v tomto ohledu **vyhovuje**. Z tab. 6.21 a z tab. 6.24 můžeme vyčíst maximální hysterezi, která se pohybuje v rozmezí **-0,004 mm až 0,003 mm**, čili taktéž **vyhovuje**.

Nejistota typu B a celková nejistota se vypočítá stejně a je i stejná jako u předchozího tasteru, viz kapitola 6.1.1, protože jsem používal stejný typ přípravku.

**3) Zjištění chyby při měření v radiálním směru (kolmo na osu): najetí proti číselníku snímacímu doteku**

a) Opakovatelnost - směr plusové hodnoty

**Tab. 6.25** Opakovatelnost (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření											$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.			
0,000	0,002	-0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	-0,001	-0,002	0,001	0,000	0,0005	1,43	0,45
0,000	0,002	0,004	0,002	-0,001	-0,001	-0,002	-0,001	0,001	-0,001	0,000	0,0003	1,89	0,60
0,000	0,003	0,001	0,003	0,000	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	0,001	0,0003	1,64	0,52
0,000	0,003	-0,002	-0,002	-0,003	-0,001	-0,001	0,000	-0,003	-0,003	0,001	-0,0011	1,97	0,62
0,000	0,004	-0,002	0,001	0,000	-0,002	-0,002	0,000	-0,001	-0,003	0,001	-0,0004	2,07	0,65

b) Reverzibilita (hystereze) - směr plusové hodnoty

**Tab. 6.26** Reverzibilita (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření											$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.			
0,000	-0,032	-0,032	-0,033	-0,033	-0,032	-0,033	-0,033	-0,033	-0,032	-0,033	-0,0326	0,52	0,16

**4) Zjištění chyby při měření v obou směrech**

a) Opakovatelnost - směr minusové hodnoty

**Tab. 6.27** Opakovatelnost (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření											$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.			
0,000	0,000	-0,001	0,001	-0,001	-0,002	-0,001	0,001	-0,004	-0,002	0,000	-0,0009	1,52	0,48
0,000	-0,002	0,001	0,000	0,001	-0,001	-0,003	0,003	-0,001	-0,001	0,000	-0,0003	1,70	0,54
0,000	0,000	-0,002	0,000	-0,001	-0,002	-0,004	-0,002	-0,001	-0,002	-0,003	-0,0017	1,25	0,40
0,000	0,001	0,000	-0,003	-0,003	-0,002	-0,001	-0,001	-0,003	-0,001	-0,002	-0,0015	1,35	0,43
0,000	-0,003	-0,001	-0,003	-0,003	0,001	-0,001	0,002	-0,001	-0,003	-0,003	-0,0015	1,84	0,58

b) Reverzibilita (hystereze) - směr minusové hodnoty

**Tab. 6.28** Reverzibilita (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření											$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.			
0,000	0,027	0,027	0,026	0,026	0,026	0,026	0,027	0,027	0,026	0,026	0,0264	0,52	0,16

Kontrolovaný 3D TASTER Universal má uvedenou přesnost v axiálním i radiálním směru  $\pm 0,01$  mm pro opakovatelnost a reverzibilitu. Z tab. 6.25 a z tab. 6.27 je vidět, že opakovatelnost se pohybuje max. v rozmezí  $\pm 0,004$  mm, z toho vyplývá, že 3D TASTER v tomto ohledu **vyhovuje**. Z tab. 6.26 a z tab. 6.28 můžeme vyčíst maximální hysterezi, která se pohybuje v rozmezí  $-0,033$  mm až  $0,027$  mm, čili **nevyhovuje**.

**5) Zjištění chyby při měření v radiálním směru (kolmo na osu): najetí proti boku číselníku snímacího doteku (pootočení o 90°)**

a) Opakovatelnost - směr plusové hodnoty

**Tab. 6.29** Opakovatelnost (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	-0,002	0,002	0,000	0,002	0,000	-0,001	0,000	0,001	-0,002	0,001	0,0001	1,45	0,46
0,000	0,002	0,002	0,001	-0,001	0,000	-0,002	-0,001	0,000	0,000	0,001	0,0002	1,32	0,42
0,000	0,000	0,002	-0,001	-0,002	0,000	-0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,0001	1,20	0,38
0,000	0,000	0,002	0,000	-0,002	-0,001	-0,002	0,001	0,002	-0,001	-0,001	-0,0002	1,48	0,47
0,000	-0,001	0,001	0,002	0,000	-0,001	0,000	0,001	0,002	0,000	0,000	0,0004	1,07	0,34

b) Reverzibilita (hystereze) - směr plusové hodnoty

**Tab. 6.30** Reverzibilita (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	-0,028	-0,027	-0,027	-0,027	-0,028	-0,028	-0,027	-0,027	-0,028	-0,027	-0,0274	0,52	0,16



## 6) Zjištění chyby při měření v obou směrech

### a) Opakovatelnost - směr minusové hodnoty

**Tab. 6.31** Opakovatelnost (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,002	0,001	0,001	0,001	-0,002	0,001	0,0005	1,08	0,34
0,000	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,002	0,001	0,000	-0,001	-0,001	-0,001	-0,0001	0,99	0,31
0,000	-0,001	0,002	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002	0,000	-0,001	0,000	0,0005	1,08	0,34
0,000	-0,002	0,000	0,001	0,001	0,002	0,000	-0,001	-0,001	0,000	0,001	0,0001	1,20	0,38
0,000	-0,001	0,000	-0,001	0,000	0,001	0,002	0,001	-0,001	-0,001	0,001	0,0001	1,10	0,35

### b) Reverzibilita (hystereze) - směr minusové hodnoty

**Tab. 6.32** Reverzibilita (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	0,027	0,026	0,026	0,027	0,027	0,027	0,026	0,027	0,026	0,027	0,0266	0,52	0,16

Kontrolovaný 3D TASTER Universal má uvedenou přesnost v axiálním i radiálním směru  $\pm 0,01$  mm pro opakovatelnost a reverzibilitu. Z tab. 6.29 a z tab. 6.31 je vidět, že opakovatelnost se pohybuje max. v rozmezí  $\pm 0,002$  mm, z toho vyplývá, že 3D TASTER v tomto ohledu **vyhovuje**. Z tab. 6.30 a z tab. 6.32 můžeme vyčíst maximální hysterezi, která se pohybuje v rozmezí **-0,028 mm až 0,027 mm**, čili **nevyhovuje**.

Tento typ 3D TASTERu Universal v axiálním směru plně vyhovuje a mohl by se dále používat. Pakliže se, ale podíváme na radiální směr, tak opakovatelnost sice vyhovuje, ale reverzibilita už nevyhovuje zhruba o 0,02 mm, což by se dalo napravit funkční zkouškou měřidla, dle kalibračního postupu. Z výsledku jde vyčíst, že tento typ je po kolizi na obráběcím stroji, což mi poté taky bylo potvrzeno.

## Porovnání 3D TASTERů Universal nového a po kolizi

*Axiální směr:*

**Tab. 6.33** Porovnání 3D TASTERů v axiálním směru

3D TASTER Universal - nový		3D TASTER Universal - po kolizi	
fe [μm]	6,7	fe [μm]	6,8
fges [μm]	5,5	fges [μm]	8,5
Opakovatelnost [mm]	±0,001	Opakovatelnost [mm]	±0,001
Reverezibilita [mm]	-0,002 až 0,003	Reverezibilita [mm]	-0,004 až 0,003

*Radiální směr - proti číselníku:*

**Tab. 6.34** Porovnání 3D TASTERů v radiálním směru (proti číselníku)

3D TASTER Universal - nový		3D TASTER Universal - po kolizi	
Opakovatelnost [mm]	-0,001 až 0,002	Opakovatelnost [mm]	±0,004
Reverezibilita [mm]	-0,0013 až 0,0016	Reverezibilita [mm]	-0,033 až 0,027

*Radiální směr - proti boku číselníku (pootočení o 90°):*

**Tab. 6.35** Porovnání 3D TASTERů v radiálním směru (pootočení o 90°)

3D TASTER Universal - nový		3D TASTER Universal - po kolizi	
Opakovatelnost [mm]	±0,001	Opakovatelnost [mm]	±0,002
Reverezibilita [mm]	-0,014 až 0,016	Reverezibilita [mm]	-0,028 až 0,027

Z těchto tabulek vyplývá, že v axiálním směru je 3D TASTER nový i po kolizi téměř stejně přesný, ale menší seřízení by určitě nebylo na škodu. Naopak v radiálním směru největším proti číselníku i po pootočení o 90° se chyby už zvětšily zhruba dvojnásobně, z toho plyne, že 3D TASTER po kolizi je méně přesný. Ovšem u obou dvou bych doporučil podle kalibračního postupu znovu provést celkovou prohlídku měřicího zařízení, např. zda je upínací stopka nepoškozená nebo seřídít upínací stopku pomocí seřizovacích šroubů apod. Dále bych provedl funkční zkoušku měřidla, např. zda je pohyb snímacího doteku plynulý, bez drhnutí nebo provést samotnou výměnu snímacího doteku pro zpřesnění 3D TASTERu atd.

### 6.1.3 3D TASTER Universal - evidenční č. 14/008 na stávajícím přípravku

Pro další porovnání výsledků jsem provedl měření 3D TASTERu, který je po kolizi i na stávajícím přípravku a to z důvodu, zda je nově vyrobený přípravek přesnější než stávající. Celkové měření a postup proběhl stejně, jak v kapitole 6.1.2.

#### 1) Zjištění chyby při měření v axiálním směru (v ose) - fe

##### a) Vynulování - směr plusové hodnoty (zatěžování)

**Tab. 6.35** Vynulování (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	$\Delta$ [μm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]														
-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,000	-2,0000	0,00	0,00	0,00
-1,750	-1,749	-1,748	-1,748	-1,747	-1,747	-1,747	-1,748	-1,749	-1,748	-1,748	-1,7479	2,10	0,74	0,23
-1,500	-1,503	-1,502	-1,501	-1,502	-1,502	-1,502	-1,502	-1,501	-1,503	-1,502	-1,5020	-2,00	0,67	0,21
-1,250	-1,248	-1,247	-1,247	-1,246	-1,247	-1,247	-1,248	-1,248	-1,247	-1,247	-1,2472	2,80	0,63	0,20
-1,000	-1,001	-1,000	-0,999	-0,999	-1,000	-0,999	-1,000	-0,999	-1,000	-1,000	-0,9997	0,30	0,67	0,21
-0,750	-0,744	-0,743	-0,742	-0,743	-0,744	-0,742	-0,742	-0,744	-0,743	-0,743	-0,7430	7,00	0,82	0,26
-0,500	-0,498	-0,497	-0,497	-0,496	-0,496	-0,496	-0,497	-0,498	-0,497	-0,497	-0,4969	3,10	0,74	0,23
-0,250	-0,248	-0,247	-0,246	-0,246	-0,247	-0,247	-0,248	-0,248	-0,247	-0,247	-0,2471	2,90	0,74	0,23
0,000	0,005	0,005	0,006	0,006	0,005	0,004	0,006	0,004	0,005	0,005	0,0051	5,10	0,74	0,23
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,00	0,00	0,00
0,250	0,252	0,253	0,252	0,253	0,254	0,255	0,252	0,253	0,254	0,253	0,2531	3,10	0,99	0,31
0,500	0,501	0,503	0,501	0,501	0,502	0,504	0,501	0,503	0,502	0,502	0,5020	2,00	1,05	0,33
0,750	0,756	0,757	0,756	0,757	0,757	0,758	0,756	0,757	0,757	0,757	0,7568	6,80	0,63	0,20
1,000	1,001	1,002	1,000	1,001	1,002	1,002	1,001	1,002	1,000	1,001	1,0012	1,20	0,79	0,25
1,250	1,254	1,254	1,252	1,254	1,255	1,256	1,253	1,255	1,255	1,254	1,2542	4,20	1,14	0,36
1,500	1,499	1,500	1,499	1,499	1,500	1,502	1,499	1,501	1,499	1,500	1,4998	-0,20	1,03	0,33
1,750	1,755	1,755	1,755	1,756	1,755	1,757	1,754	1,756	1,755	1,756	1,7554	5,40	0,84	0,27
2,000	2,004	2,004	2,004	2,003	2,005	2,006	2,005	2,005	2,004	2,005	2,0045	4,50	0,85	0,27

##### b) Opakovatelnost - směr plusové hodnoty

**Tab. 6.36** Opakovatelnost (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,001	0,000	-0,0001	0,57	0,18
0,000	-0,001	-0,001	0,001	-0,001	-0,001	0,001	-0,001	0,001	-0,001	0,000	-0,0003	0,95	0,30
0,000	0,000	-0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,0003	0,67	0,21
0,000	-0,001	0,000	-0,001	0,000	-0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	-0,001	-0,0002	0,79	0,25
0,000	0,000	-0,001	0,001	-0,001	0,000	-0,001	0,000	0,001	0,001	-0,001	-0,0001	0,88	0,28

c) Reverzibilita (hystereze) - směr plusové hodnoty

**Tab. 6.37** Reverzibilita (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,0023	0,48	0,15

2) Zjištění chyby při měření v obou směrech - fges

a) Vynulování - směr minusové hodnoty (odlehčování)

**Tab. 6.38** Vynulování (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	$\Delta$ [μm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]														
2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,0000	0,00	0,00	0,00
1,750	1,749	1,750	1,750	1,751	1,750	1,749	1,749	1,751	1,750	1,750	1,7499	0,10	0,74	0,23
1,500	1,495	1,494	1,494	1,496	1,495	1,494	1,494	1,496	1,496	1,495	1,4949	5,10	0,88	0,28
1,250	1,248	1,247	1,248	1,249	1,249	1,247	1,247	1,248	1,249	1,248	1,2480	2,00	0,82	0,26
1,000	0,994	0,994	0,995	0,995	0,996	0,994	0,994	0,995	0,996	0,995	0,9948	5,20	0,79	0,25
0,750	0,748	0,747	0,747	0,748	0,747	0,746	0,747	0,748	0,748	0,747	0,7473	2,70	0,67	0,21
0,500	0,496	0,497	0,496	0,497	0,496	0,495	0,496	0,497	0,497	0,496	0,4963	3,70	0,67	0,21
0,250	0,248	0,246	0,248	0,247	0,248	0,246	0,247	0,248	0,248	0,247	0,2473	2,70	0,82	0,26
0,000	-0,006	-0,005	-0,006	-0,004	-0,004	-0,006	-0,005	-0,004	-0,004	-0,005	-0,0049	4,90	0,88	0,28
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,00	0,00	0,00
-0,250	-0,250	-0,252	-0,251	-0,252	-0,253	-0,252	-0,252	-0,252	-0,252	-0,253	-0,2519	1,90	0,88	0,28
-0,500	-0,504	-0,505	-0,503	-0,504	-0,505	-0,504	-0,505	-0,505	-0,504	-0,505	-0,5044	4,40	0,70	0,22
-0,750	-0,749	-0,751	-0,749	-0,751	-0,752	-0,751	-0,751	-0,751	-0,751	-0,752	-0,7508	0,80	1,03	0,33
-1,000	-1,003	-1,005	-1,004	-1,005	-1,005	-1,005	-1,005	-1,006	-1,005	-1,006	-1,0049	4,90	0,88	0,28
-1,250	-1,251	-1,252	-1,253	-1,253	-1,253	-1,253	-1,253	-1,253	-1,255	-1,254	-1,2530	3,00	1,05	0,33
-1,500	-1,505	-1,507	-1,505	-1,507	-1,506	-1,506	-1,506	-1,507	-1,507	-1,507	-1,5063	6,30	0,82	0,26
-1,750	-1,751	-1,753	-1,750	-1,752	-1,754	-1,752	-1,752	-1,753	-1,752	-1,753	-1,7522	2,20	1,14	0,36
-2,000	-2,004	-2,006	-2,003	-2,005	-2,005	-2,005	-2,005	-2,006	-2,005	-2,006	-2,0050	5,00	0,94	0,30

b) Opakovatelnost - směr minusové hodnoty

**Tab. 6.39** Opakovatelnost (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

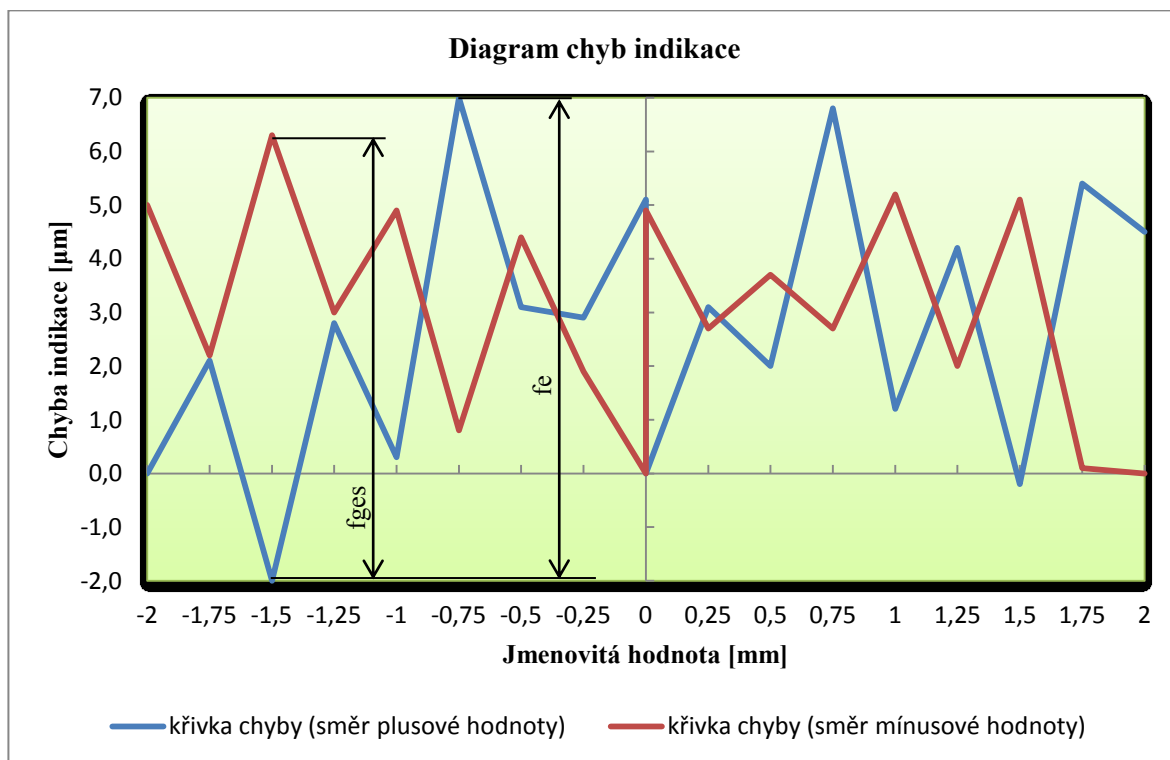
č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	$s(x)$ [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	-0,001	-0,001	-0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	-0,001	0,000	-0,001	-0,0004	0,70	0,22
0,000	0,000	-0,001	0,000	-0,001	0,000	0,001	0,000	-0,001	0,001	0,000	-0,0001	0,74	0,23
0,000	-0,001	0,000	0,001	-0,001	0,001	-0,001	-0,001	0,000	0,001	-0,001	-0,0002	0,92	0,29
0,000	-0,001	0,000	0,001	-0,001	0,001	0,000	-0,001	-0,001	0,000	-0,001	-0,0003	0,82	0,26
0,000	0,000	-0,001	0,000	-0,001	0,001	-0,001	0,000	-0,001	0,001	0,000	-0,0002	0,79	0,25

c) Reverzibilita (hystereze) - směr minusové hodnoty

**Tab. 6.40** Reverzibilita (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	$s(x)$ [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	-0,003	-0,004	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,004	-0,003	-0,003	-0,004	-0,0033	0,48	0,15

Z tab. 6.35 a tab. 6.38 jsem opět udělal diagram chyb indikace. Hodnoty v tomto grafu ve směru plusových hodnot jsem získal odečtením měřicího kroku od aritmetického průměru, viz vzorový příklad (6.2). Naopak ve směru minusových hodnot jsem získal tyto hodnoty odečtením aritmetického průměru od měřicího kroku, viz vzorový příklad (6.5).



**Obr. 6.4** Diagram chyb indikace - axiální směr

$$f_e = 2,0 + 7,0 = \mathbf{9 \text{ } [\mu m]}$$

$$f_{ges} = 0,0 + 6,3 = \mathbf{6,3 \text{ } [\mu m]}$$

Dovolená chyba s dělením 0,01 mm dle bývalé ČSN 25 1801:

Třída přesnosti 0 => max. dovolená chyba v celém měřicím rozsahu pro 2 je **10 [μm]** => ***f<sub>e</sub>* a *f<sub>ges</sub>* vyhovuje.**

Kontrolovaný 3D TASTER Universal má uvedenou přesnost v axiálním i radiálním směru **±0,01mm** pro opakovatelnost a reverzibilitu. Z tab. 6.36 a z tab. 6.39 je vidět, že opakovatelnost se pohybuje max. v rozmezí **±0,001 mm**, z toho vyplývá, že 3D TASTER v tomto ohledu **vyhovuje**. Z tab. 6.37 a z tab. 6.40 můžeme vyčíst maximální hysterezi, která se pohybuje v rozmezí **-0,004 mm až 0,003 mm**, čili taktéž **vyhovuje**.

### ***3) Stanovení standardní nejistoty typu B v axiálním směru***

*Zdroje nejistot:*

#### **a) Chyba etalonu hlavice mikrometrické digitální - STINMEYER**

Dle DIN 863-1 dovolená chyba  $z_1 = 0,004 \text{ [mm]}$  – rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení

$$u_{B1} = \frac{z_1}{\sqrt{3}} \cdot c_1 \qquad u_{B1} = \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot 1 \qquad \mathbf{u_{B1} = 2,3094 \text{ } [\mu m]}$$

#### **b) Nejistota kalibrace etalonu z kalibračního listu**

Hlavice mikrometrická digitální -  $U_{95} = 0,0015 \text{ [mm]}$  – normální Gaussovo rozdělení

$$u_{B2} = \frac{U_{95}}{2} \cdot c_2 \qquad u_{B1} = \frac{1,5}{2} \cdot 1 \qquad \mathbf{u_{B2} = 0,7500 \text{ } [\mu m]}$$

#### **c) Nejistota způsobená teplotním rozdílem mezi etalonem a 3D TASTERem**

Odhad  $\delta_T = \pm 0,5^\circ\text{C}$  - rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení

$$u_{B3} = \frac{\delta_T}{\sqrt{3}} \cdot \alpha \cdot L \qquad u_{B3} = \frac{0,5}{\sqrt{3}} \cdot 11,5 \cdot 0,004 \qquad \mathbf{u_{B3} = 0,0133 \text{ } [\mu m]}$$

#### **d) Nejistota způsobená vlivem odchylky teploty okolí při kalibraci od 20°C**

Odhad  $\delta_{T20} = \pm 1^\circ\text{C}$  - rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení

$$u_{B4} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\delta_{T20}}{\sqrt{3}} \cdot L \quad u_{B4} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 0,004 \quad \mathbf{u_{B4} = 0,0027 [\mu m]}$$

e) Chyba způsobená najížděním na rysky 3D TASTERu

1 dílek = 0,01 [mm] => odhad  $z_5 = 0,001$  [mm] - rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení

$$u_{B5} = \frac{z_5}{\sqrt{3}} \cdot c_5 \quad u_{B5} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 1 \quad \mathbf{u_{B5} = 0,5774 [\mu m]}$$

f) Chyba souososti přípravku – z kontroly funkčních částí přípravku

– normální Gaussovo rozdělení

$$u_{B6} = \frac{z_6}{3} \cdot c_6 \quad u_{B6} = \frac{0}{3} \cdot 1 \quad \mathbf{u_{B6} = 0 [\mu m]}$$

g) Výsledná nejistota typu B

$$u_B^2 = u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_{B5}^2 + u_{B6}^2$$

$$u_B = \sqrt{2,3094^2 + 0,75^2 + 0,0133^2 + 0,0027^2 + 0,5774^2 + 0^2} \quad \mathbf{u_B = 2,4959 [\mu m]}$$

h) Kombinovaná standardní nejistota

Nejistotu typu A volím tu největší z předchozích tab. 6.35 až 6.40 =>  $u_A = 0,36$  [μm]

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad u_c = \sqrt{0,36^2 + 2,4959^2} \quad \mathbf{u_c = 2,5217 [\mu m]}$$

i) Rozšířená nejistota měření pro pravděpodobnost ~ 95%

$$U = k \cdot u_c \quad U = 2 \cdot 2,5217 \quad \mathbf{U = 5,0434 [\mu m]}$$

Např. hodnota **-1,250 mm** - směr plusové hodnoty:

$$\mathbf{\underline{\Delta = 0,0028 \pm 0,005 [mm]}}$$

**4) Zjištění chyby při měření v radiálním směru (kolmo na osu): najetí proti číselníku snímacímu doteku**

a) Opakovatelnost - směr plusové hodnoty

**Tab. 6.41** Opakovatelnost (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	-0,005	0,000	0,005	0,005	0,000	0,005	-0,005	0,005	0,005	0,000	0,0015	4,12	1,30
0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,005	0,005	0,005	0,000	0,000	0,005	0,0025	2,64	0,83
0,000	0,000	0,005	0,000	0,005	0,005	0,000	0,000	0,005	0,005	0,000	0,0025	2,64	0,83
0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,005	-0,005	0,005	0,005	0,005	0,0020	3,50	1,11
0,000	-0,005	-0,005	0,005	0,000	0,000	0,005	-0,005	-0,005	0,000	0,005	-0,0005	4,38	1,38

b) Reverzibilita (hystereze) - směr plusové hodnoty

**Tab. 6.42** Reverzibilita (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	0,200	0,200	0,200	0,195	0,205	0,205	0,200	0,195	0,205	0,205	0,2010	3,94	1,25

**5) Zjištění chyby při měření v obou směrech**

a) Opakovatelnost - směr minusové hodnoty

**Tab. 6.43** Opakovatelnost (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	0,000	0,005	0,005	0,005	0,000	-0,005	-0,005	0,005	0,000	0,005	0,0015	4,12	1,30
0,000	0,005	-0,005	0,005	0,005	0,005	0,000	0,005	0,000	0,005	0,005	0,0030	3,50	1,11
0,000	0,005	0,005	0,005	0,000	0,000	0,000	-0,005	0,005	0,000	0,005	0,0020	3,50	1,11
0,000	0,005	0,005	0,000	0,005	0,000	0,005	0,000	0,000	0,005	0,000	0,0025	2,64	0,83
0,000	0,000	0,005	0,005	0,005	0,005	0,000	0,005	0,000	0,005	0,005	0,0035	2,42	0,76

b) Reverzibilita (hystereze) - směr minusové hodnoty

**Tab. 6.44** Reverzibilita (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	0,165	0,175	0,170	0,170	0,175	0,175	0,170	0,175	0,175	0,170	0,1720	3,50	1,11



Kontrolovaný 3D TASTER Universal má uvedenou přesnost v axiálním i radiálním směru  $\pm 0,01\text{ mm}$  pro opakovatelnost a reverzibilitu. Z tab. 6.41 a z tab. 6.43 je vidět, že opakovatelnost se pohybuje max. v rozmezí  $\pm 0,005\text{ mm}$ , z toho vyplývá, že 3D TASTER v tomto ohledu **vyhovuje**. Z tab. 6.42 a z tab. 6.44 můžeme vyčíst maximální hysterezi, která se pohybuje v rozmezí **0,165 mm až 0,205 mm**, čili **nevyhovuje**.

**6) Zjištění chyby při měření v radiálním směru (kolmo na osu): najetí proti boku číselníku snímacího doteku (pootočení o  $90^\circ$ )**

a) Opakovatelnost - směr plusové hodnoty

**Tab. 6.45** Opakovatelnost (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	-0,005	-0,005	-0,005	0,000	0,000	-0,005	-0,0015	3,37	1,07
0,000	0,005	-0,005	-0,005	-0,005	0,000	-0,005	0,000	-0,005	-0,005	-0,005	-0,0030	3,50	1,11
0,000	-0,005	0,000	-0,005	-0,005	-0,005	0,005	-0,005	0,005	-0,005	-0,005	-0,0025	4,25	1,34
0,000	-0,005	-0,005	0,000	0,000	-0,005	0,000	0,000	0,000	-0,005	0,000	-0,0020	2,58	0,82
0,000	-0,005	-0,005	-0,005	0,005	-0,005	-0,005	0,000	0,005	0,000	-0,005	-0,0020	4,22	1,33

b) Reverzibilita (hystereze) - směr plusové hodnoty

**Tab. 6.46** Reverzibilita (směr plusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	0,165	0,165	0,170	0,160	0,165	0,170	0,170	0,170	0,170	0,165	0,1670	3,50	1,11

## 7) Zjištění chyby při měření v obou směrech

### a) Opakovatelnost - směr minusové hodnoty

**Tab. 6.47** Opakovatelnost (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	0,005	-0,005	0,005	0,005	0,000	-0,005	0,000	0,005	0,000	0,005	0,0015	4,12	1,30
0,000	0,000	-0,005	0,005	0,005	-0,005	0,005	0,005	0,000	0,005	0,005	0,0020	4,22	1,33
0,000	-0,005	-0,005	-0,005	0,005	0,005	-0,005	0,000	0,000	-0,005	0,000	-0,0015	4,12	1,30
0,000	-0,005	0,000	0,000	0,005	0,005	0,000	0,005	0,000	0,005	0,005	0,0020	3,50	1,11
0,000	-0,005	0,000	0,005	0,005	0,000	0,000	0,005	0,005	0,005	0,005	0,0025	3,54	1,12

### b) Reverzibilita (hystereze) - směr minusové hodnoty

**Tab. 6.48** Reverzibilita (směr minusové hodnoty) - naměřené a vypočtené hodnoty

č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	$\bar{x}$ [mm]	s (x) [μm]	$u_A$ [μm]
kroky [mm]													
0,000	0,140	0,145	0,140	0,150	0,150	0,150	0,145	0,150	0,150	0,145	0,1465	4,12	1,30

Kontrolovaný 3D TASTER Universal má uvedenou přesnost v axiálním i radiálním směru  $\pm 0,01$  mm pro opakovatelnost a reverzibilitu. Z tab. 6.45 a z tab. 6.47 je vidět, že opakovatelnost se pohybuje max. v rozmezí  $\pm 0,005$  mm, z toho vyplývá, že 3D TASTER v tomto ohledu **vyhovuje**. Z tab. 6.46 a z tab. 6.48 můžeme vyčíst maximální hysterezi, která se pohybuje v rozmezí **0,140 mm až 0,170 mm**, čili **nevyhovuje**.

## 8) Stanovení standardní nejistoty typu B v radiálním směru

*Zdroje nejistot:*

### a) Chyba etalonu číselníkový úchylkoměr analogový - KÄFER

Dle DIN 863-1 dovolená chyba  $z_1 = 0,015$  [mm] – rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení

$$u_{B1} = \frac{z_1}{\sqrt{3}} \cdot c_1 \quad u_{B1} = \frac{15}{\sqrt{3}} \cdot 1 \quad u_{B1} = 8,6603 \text{ [μm]}$$

### b) Nejistota kalibrace etalonu z kalibračního listu

Hlavice mikrometrická digitální -  $U_{95} = 0,002$  [mm] – normální Gaussovo rozdělení

$$u_{B2} = \frac{U_{95}}{2} \cdot c_2 \quad u_{B1} = \frac{2}{2} \cdot 1 \quad \mathbf{u_{B2} = 1,0000 [\mu m]}$$

c) Nejistota způsobená teplotním rozdílem mezi etalonem a 3D TASTERem

Odhad  $\delta_T = \pm 0,5^\circ\text{C}$  - rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení

$$u_{B3} = \frac{\delta_T}{\sqrt{3}} \cdot \alpha \cdot L \quad u_{B3} = \frac{0,5}{\sqrt{3}} \cdot 11,5 \cdot 0,004 \quad \mathbf{u_{B3} = 0,0133 [\mu m]}$$

d) Nejistota způsobená vlivem odchylky teploty okolí při kalibraci od  $20^\circ\text{C}$

Odhad  $\delta_{T20} = \pm 1^\circ\text{C}$  - rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení

$$u_{B4} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\delta_{T20}}{\sqrt{3}} \cdot L \quad u_{B4} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 0,004 \quad \mathbf{u_{B4} = 0,0027 [\mu m]}$$

e) Chyba způsobená najížděním na rysky 3D TASTERu

1 dílek = 0,01 [mm] => odhad  $z_5 = 0,001$  [mm] - rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení

$$u_{B5} = \frac{z_5}{\sqrt{3}} \cdot c_5 \quad u_{B5} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 1 \quad \mathbf{u_{B5} = 0,5774 [\mu m]}$$

f) Chyba souososti přípravku – z kontroly funkčních částí přípravku

– normální Gaussovo rozdělení

$$u_{B6} = \frac{z_6}{3} \cdot c_6 \quad u_{B6} = \frac{45}{3} \cdot 1 \quad \mathbf{u_{B6} = 15,000 [\mu m]}$$

g) Výsledná nejistota typu B

$$u_B^2 = u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_{B5}^2 + u_{B6}^2$$

$$u_B = \sqrt{8,6603^2 + 1^2 + 0,0133^2 + 0,0027^2 + 0,5774^2 + 15^2} \quad \mathbf{u_B = 17,359 [\mu m]}$$

h) Kombinovaná standardní nejistota

Nejistotu typu A volím tu největší z předchozích tab. 6.41 až 6.48 =>  $u_A = 1,38$  [ $\mu\text{m}$ ]

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad u_c = \sqrt{1,38^2 + 17,359^2} \quad \mathbf{u_c = 17,414 [\mu m]}$$

i) Rozšířená nejistota měření pro pravděpodobnost  $\sim 95\%$

$$U = k \cdot u_c \quad U = 2 \cdot 17,414 \quad \mathbf{U = 34,828 [\mu m]}$$

Např. reverzibilita - najetí proti boku číselníku - směr plusové hodnoty:

$$\underline{\Delta = 0,1670 \pm 0,035 \text{ [mm]}}$$

V této kapitole jsem měřil 3D TASTER Universal po kolizi, a to na stávajícím přípravku. Axiální směr taktéž vyhovoval ve všech parametrech, jak u předcházejících měření a tudíž se v tomto směru může používat dále. Naopak v radiálním směru sice vycházela opakovatelnost, ale nevycházela reverzibilita, která byla větší od dovolené chyby, až zhruba o 0,150. Více o takto vysoké chybě si povíme v následujícím odstavci.

#### Porovnání 3D TASTERů Universal po kolizi na novém a stávajícím přípravku

*Axiální směr:*

**Tab. 6.49** Porovnání 3D TASTERů po kolizi v axiálním směru

3D TASTER Universal - nový přípravek		3D TASTER Universal - stávající přípravek	
fe [μm]	6,8	fe [μm]	9,0
fges [μm]	8,5	fges [μm]	6,3
Opakovatelnost [mm]	±0,001	Opakovatelnost [mm]	±0,001
Reverezibilita [mm]	-0,004 až 0,003	Reverezibilita [mm]	-0,004 až 0,003

*Radiální směr - proti číselníku:*

**Tab. 6.50** Porovnání 3D TASTERů po kolizi v radiálním směru (proti číselníku)

3D TASTER Universal - nový přípravek		3D TASTER Universal - stávající přípravek	
Opakovatelnost [mm]	±0,004	Opakovatelnost [mm]	±0,005
Reverezibilita [mm]	-0,033 až 0,027	Reverezibilita [mm]	0,165 až 0,205

*Radiální směr - proti boku číselníku (pootočení o 90°):*

**Tab. 6.51** Porovnání 3D TASTERů po kolizi v radiálním směru (pootočení o 90°)

3D TASTER Universal - nový přípravek		3D TASTER Universal - stávající přípravek	
Opakovatelnost [mm]	±0,002	Opakovatelnost [mm]	±0,005
Reverezibilita [mm]	-0,028 až 0,027	Reverezibilita [mm]	0,140 až 0,170

*Standardní nejistota v axiálním a radiálním směru:*

**Tab. 6.52** Porovnání 3D TASTERů po kolizi pomocí standardní nejistoty

3D TASTER Universal - nový přípravek		3D TASTER Universal - stávající přípravek	
Axiální směr [ $\mu\text{m}$ ]	U = 5,0210	Axiální směr [ $\mu\text{m}$ ]	U = 5,0434
Radiální směr [ $\mu\text{m}$ ]	U = 9,1516	Radiální směr [ $\mu\text{m}$ ]	U = 34,828

Když prvně porovnám tyto dva přípravky v axiálním směru, tak zjistíme, že se od sebe příliš neliší. Stávající přípravek má vyšší  $f_e$ , naopak nový přípravek vyšší  $f_{ges}$ , ale tyto rozdíly jsou tak malé, že nehrají až tak velkou roli. Hodnoty jsou podobné z toho důvodu, že jsem použil stejné měřidlo.

Větší změny už nastávají ale v radiálním směru, jak najetím proti číselníku, tak i najetím proti boku číselníku. Opakovatelnost je o něco málo větší u stávajícího přípravku a to z toho důvodu, že použité měřidlo KÄFER má pouze odečítání 0,01 mm. Ovšem, když se podíváme na reverzibilitu, tak zde už jsou rozdíly větší. Toto je způsobeno zaprvé tím, že stávající přípravek má použitý méně přesný číselníkový úchylkoměr (např. analogové odečítání x digitální odečítání nebo odečítání 0,01 mm x odečítání 0,001 mm apod.). Dále může docházet u stávajícího přípravku k Abbeho chybě prvního řádu, kdy 3D TASTER nemusí být přesně v ose s měřidly, což se u nového přípravku stát nemůže.

Podle mého názoru a výsledků měření, které jsem prováděl, nastávala největší chyba právě v Abbeho chybě prvního řádu, kdy měřící dotek byl mírně pod osou s měřidly. Protože při změně pohybu se měřící dotek pohyboval nahoru a dolů po tyčce číselníkového úchylkoměru, tedy vznikala kroutící moment a tudíž mohlo dojít ke zkreslování výsledků. Naopak u nového přípravku byl pohyb plynulý a v pořádku.

V tab. 6.52 jsem porovnával výslednou rozšířenou nejistotu měření pro pravděpodobnost ~95%. V axiálním směru vycházela nejistota téměř stejně a to z toho důvodu, že jsem použil stejné měřidlo a odchylka házení v obou případech byla nulová. Když se ale podívám na radiální směr, tak je možno vidět hodně velkou nepřesnost u stávajícího přípravku. Je to dáno tím, že u stávajícího přípravku se používá méně přesný číselníkový úchylkoměr a odchylku házení jsem naměřil 4x větší než u nového přípravku.

## 7 CELKOVÉ ZHODNOCENÍ

### Náhrada stávajícího přípravku

Důvodem zkonstruování nového přípravku byla řada chyb u stávajícího přípravku. Stávající přípravek byl prvním prototypem, na kterém se zkoušelo kalibrovat 3D TASTERy. Postupem doby, ale přibývaly nové 3D TASTERy a přípravek začal být nevyhovující, např. při použití jiného průměru upínací stopky taster nesplňoval podmínku souososti s měřidly a tudíž docházelo k Abbeho chybě prvního řádu. Dále se zde mohly kalibrovat 3D TASTERy jenom určité délky a pro přesnější měření byl nevyhovující analogový číselníkový úchylkoměr.

Tyto chyby jsem u nového přípravku odstranil. Souososti jsem dosáhl pomocí kostky a upínací kleštiny, kterou jsem vložil do kostky pomocí ložisek a tím jsem zaručil souosost při upnutí jakéhokoliv upínacího průměru. V novém přípravku můžeme kalibrovat 3D TASTERy různých délek díky vodícímu peru na základové desce, po které se pohybuje kostka. Poslední důležitou změnu, kterou jsem provedl, byl nově zvolený číselníkový úchylkoměr digitální s odečítáním 0,001 mm, jenž zpřesnil kalibraci v radiálním směru.

### Nový přípravek

Jeho další výhoda je relativně malá hmotnost. I když jsou hmotnostně skoro stejné (stávající 5,2 kg a nový 5 kg oba dva i s měřidly), tak ale nesmíme opomenout, že nový přípravek je rozměrově o dost větší. Malá hmotnost je dána tím, že celý přípravek je vyrobený z duralu, který je sám o sobě lehký.

Nový přípravek umožňuje přenos dat do PC, díky digitální hlavici mikrometrické STINMEYER a digitálnímu číselníkovému úchylkoměru MAHR 1075R. Přenos dat do PC tím pádem urychlí práci při zpracování výsledků, které je jinak zdlouhavé, o čemž jsem se sám přesvědčil.

Celkové náklady přípravku činily přijatelných **5 345,- Kč**. Důležité je zde zmínit, že do nákladů jsem nemusel zahrnovat měřidla. Hlavici mikrometrickou analogovou jsem použil z vyřazeného třmenového mikrometru. Další dvě měřidla - hlavici mikrometrickou digitální a číselníkový úchylkoměr digitální jsem použil z vybavení kalibrační laboratoře. Nejdražší byl kleštinový upínač, který se musel objednat od firmy BOW.

## **Kalibrační postup**

Kalibrační postup pro 3D TASTERy, jak už bylo zmíněno v předcházejících kapitolách, jsem zpracoval podle kalibračního postupu číselníkových úchylkoměrů. Zpracovával jsem ho podle tohoto postupu z toho důvodu, že jak číselníkový úchylkoměr, tak i 3D TASTER mají stejný princip v axiálním směru. Pokoušel jsem se oslovit společnost HAIMER, která tyto 3D TASTERy vyrábí, zda by mi neposkytli informace, jak kalibrují tastery. Bohužel mi neodpověděli, tak proto jsem zvolil variantu zpracování kalibračního postupu podle kalibračního postupu číselníkových úchylkoměrů.

## **Vyhodnocení výsledků měření - porovnání na novém přípravku**

Nejprve jsem porovnával 3D TASTERy Universal na novém přípravku. Kalibroval jsem zde stejné typy 3D TASTERů, ovšem jeden nový bez předchozího použití a druhý byl po kolizi na obráběcím stroji. V axiálním směru oba 3D TASTERy vykazovaly podobné hodnoty, ale taster po kolizi byl méně přesný. Na základě výsledků experimentální části jsem zjistil, že 3D TASTER po kolizi v radiálním směru vykazuje větší chyby hlavně u reverzibility. Z toho vyplývá, že nový 3D TASTER je přesnější. V průběhu měření nenastávaly žádné chyby, které se vyskytovaly u předchozího přípravku.

Došel jsem zde k důležitému vyhodnocení, že 3D TASTERy se nemusí zbytečně kalibrovat v celém rozsahu stupnice v radiálním směru. V průběhu měření v tomto směru, totiž vykazovaly tastery velké nepřesnosti. Po prostudování příslušné odborné literatury o 3D TASTERech jsem si potvrdil zjištění, že v radiálním směru není důvod kalibrovat měřidlo v rozsahu celé stupnice, ale stačí se pouze zaměřit na opakovatelnost a hysterezi.

## **Vyhodnocení výsledků měření - porovnání nového a stávajícího přípravku**

Nejdůležitějším porovnáním v celé práci bylo na závěr posouzení, zda nový přípravek přispěje ke zpřesnění a zkvalitnění vlastní kalibrace a zda jeho použití splní požadavky jak z technického, tak i ekonomického pohledu. U axiálního směru se vhodnost přípravku nějak výrazně neprojevila - odchylka házení v axiálním směru u stávajícího i nového přípravku byla nulová, protože jsem použil stejnou digitální mikrometrickou hlavici.

Naopak u radiálního směru se mi už výsledky lišili. Je to zapříčiněno tím, že nový přípravek vykazuje podstatně menší odchylku radiálního házení, což mělo vliv na snížení nejistoty měření. Dále u nového přípravku jsem použil kvalitnější číselníkový úchylkoměr,

který je digitální a má odečítání 0,001 mm, tudíž jsem dosáhnul přesnějších hodnoty. Hlavně, ale nenastávala u nového přípravku Abbeho chyba prvního řádu, kdy u stávajícího přípravku bylo vidět, že snímací dotek 3D TASTERu nebyl přesně v ose s měřidly. To se projevilo ve výsledku měření u reverzibility, když při změně pohybu vznikl krouticí moment (snímací dotek se pohyboval po dotykové ploše číselníkového úchylkoměru nahoru a dolů). Výsledky měření u stávajícího přípravku proto byly z tohoto důvodu zkreslené.



## 8 ZÁVĚR

V diplomové práci jsem se zabýval návrhem nového přípravku a následnou kalibrací 3D TASTERů. Nejdříve jsem zhodnotil stav dosud používaného přípravku, u kterého byla zjištěna řada chyb. Jeho největší slabina byla v prizmatickém držáku, kdy kvůli němu vznikala Abbeho chyba prvního řádu. Např. při upnutí průměru o velikosti 16 mm se dotykový snímač nacházel pod osou dotykových ploch měřidel o 4,3 mm. Dále byl nevyhovující číselníkový úchylkoměr analogový - fy KÄFER.

Tyto chyby jsem v návrhu nového přípravku odstranil. Prizmatický držák jsem nahradil kostkou, ve které jsem upnul kleštinový upínač, jenž nám zaručuje stálou souosost s měřidly. Analogový číselníkový úchylkoměr jsem odstranil a místo něho jsem zvolil kvalitnější číselníkový úchylkoměr digitální fy MAHR 1075R, který je o jeden řád přesnější. Přípravek jsem ještě zdokonalil tím, že jsem do základové desky vložil vodící pero, na němž se pohybuje kostka, a tak je možno kalibrovat 3D TASTERy různých délek.

Jelikož firma UNIMETRA, spol. s r.o. nedisponuje kalibračním postupem pro kalibraci 3D TASTERů, zpracoval jsem nový. 3D TASTER pracuje v axiálním směru na stejném principu jako analogové číselníkové úchylkoměry, tak jsem využil kalibrační postup pro tento typ měřidel jako základ pro zpracování kalibračního postupu pro 3D TASTERy. Nový kalibrační postup obsahuje rozšíření o kalibraci v radiálním směru.

Dle zpracovaného kalibračního postupu jsem zrealizoval praktickou část diplomové práce. Na novém přípravku jsem kalibroval dva 3D TASTERy stejného typu, pro zjištění, zda nemá nový přípravek výkyvy během měření. Při samotném měření nenastávaly žádné velké změny a tolerance se pohybovala max. v rozmezí  $\pm 0,002$  mm.

Z výsledků porovnávání 3D TASTERů s použitím stávajícího a nového přípravku vyplývá, že nový přípravek přispívá ke zkvalitnění a zpřesnění vlastní kalibrace. U nového přípravku, byly prakticky všechny hodnoty sledovaných parametrů nižší, nejvíce se to projevilo při kontrole reverzibility, kde výsledky byly o jeden řád přesnější v radiálním směru. Nejistota měření v tomto směru je také menší a to díky odstranění Abbeho chyby prvního řádu a snížení odchylky házení v radiálním směru.

Myslím si, že cíl diplomové práce jsem splnil. Výsledky praktické části potvrdily vhodnost navrženého přípravku včetně navrženého kalibračního postupu pro kalibraci 3D TASTERů, který bude firma moci dále používat. Pro firmu bude snad moje práce velkým pozitivem a přínosem do budoucna.

### PODĚKOVÁNÍ:

Rád bych tímto poděkoval Ing. Šárce Tiché, Ph.D. a Ing. Janu Vavřinovi za odborné vedení, cenné rady, trpělivost a obětavost při řešení diplomové práce.

Rovněž bych rád poděkoval svoji rodině a přítelkyni za podporu při řešení této práce.

## 9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NENÁHLO, Čeněk. *Metrologie výrobního procesu*. Praha: Vydavatelství norem, 1990, 112 s. ISBN 80-85111-08-X.
- [2] Dokument EA4/02. *Vyjadřování nejistot měření při kalibraci*. Praha: Český normalizační institut, 2001, 70 s.
- [3] ČSN EN ISO 10012-1. *Požadavky na zabezpečení jakosti měřicího zařízení*. Praha: Český normalizační institut, 2003, 27 s.
- [4] ČSN ISO 690. *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996, 32 s.
- [5] KATALOG FIRMY UNIMETRA SPOL. S.R.O. *Měřidla I: Měřicí technika metrologie*. 9. vydání. Ostrava, 2008.
- [6] *Misan - CNC obráběcí stroje* [online]. © 2002-2013 [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: <http://www.misan.cz/>
- [7] *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. © 2013 [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/>
- [8] *Kancelářská technika a polygrafické stroje - Cyklos Choltice* [online]. © Cyklos Choltice [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: <http://www.cyklos.cz/>
- [9] *Unimetra* [online]. © 2013 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.unimetra.cz/>
- [10] *Haimer GmbH* [online]. © 2013 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.haimer.com/>
- [11] *Mahr Metrology* [online]. © Mahr GmbH [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.mahr.com/>
- [12] ČSN EN ISO 463. *Geometrické specifikace výrobků (GPS) - Délková měřidla - Konstrukční a metrologické charakteristiky mechanických úchylkoměrů*. Praha: Český normalizační institut, 2006, 18 s.
- [13] ČSN EN ISO 9493. *Geometrické specifikace výrobků (GPS) - Rozměrové měřicí zařízení: Číselníkové úchylkoměry (vahadlového typu) - Návrhové a metrologické charakteristiky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 20 s.

## **10 SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha A - Kalibrace 3D TASTER Universal: evidenční č. 14/008

Příloha B - Kalibrace 3D TASTER Universal: evidenční č. 14/008 na stávajícím přípravku

### **Přílohy uloženy na vnitřní straně zadního přideští**

Příloha C - DP 101 - Přípravek

Příloha D - DP 101.1 - Kostka

Příloha E - DP 101.2 - Základová deska

Příloha F - DP 101.3 - Kleštinový upínač

Příloha G - DP 101.4 - Kolečko

Příloha H - Návrh pracovního postupu - Kalibrace 3D TASTERů